



TESIS - TE142599

**OPERASI OPTIMUM *STAND-ALONE MICROGRID*  
MENGUNAKAN METODE *SELF ADAPTIVE*  
*MODIFIED FIREFLY ALGORITHM* DENGAN  
MEMPERTIMBANGKAN KARAKTERISTIK UMUR  
BATERAI**

APRILELY AJENG FITRIANA  
2213 201 022

DOSEN PEMBIMBING  
Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc , Ph.D  
Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, M.T.

PROGRAM MAGISTER  
BIDANG KEAHLIAN TEKNIK SISTEM TENAGA  
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2015



TESIS - TE142599

# **OPERATION OPTIMIZATION STAND-ALONE MICROGRID USING SELF ADAPTIVE MODIFIED FIREFLY ALGORITHM CONSIDERING LIFETIME CHARACTERISTICS OF BATTERY**

APRILELY AJENG FITRIANA  
2213 201 022

## **ADVISOR**

Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc , Ph.D  
Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, M.T.

MAGISTER PROGRAM  
POWER SYSTEM ENGINEERING  
ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT  
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2015

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar  
Magister Teknik (MT)

di  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:  
**APRILELY AJENG FITRIANA**  
**NRP. 2213201022**

Tanggal Ujian : 17 Juni 2015  
Periode Wisuda : September 2015

Disetujui oleh:

1. **Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.** (Pembimbing I)  
NIP. 1949 07 15/1974 12 1001
2. **Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT** (Pembimbing II)  
NIP. 1964 04 05 1990 02 1001
3. **Prof. Dr. Eng. Imam Robandi, MT.** (Penguji)  
NIP. 1963 08 17 1990 03 1001
4. **Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT.** (Penguji)  
NIP. 1974 11 29 2000 12 1001
5. **Dr. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng** (Penguji)  
NIP. 1973 09 27 1998 03 1004
6. **Dr. Dimas Anton Asfani, ST., MT.** (Penguji)  
NIP. 1981 09 05 2005 01 1002



# **OPERASI OPTIMUM *STAND-ALONE MICROGRID* MENGUNAKAN METODE *SELF ADAPTIVE MODIFIED FIREFLY ALGORITHM* DENGAN MEMPERTIMBANGKAN KARAKTERISTIK UMUR BATERAI**

Nama Mahasiswa : Aprilely Ajeng Fitriana  
NRP : 2213 201 022  
Pembimbing : 1. Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc, Ph.D.  
2. Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, M.T.

## **ABSTRAK**

*Stand-alone microgrid* merupakan sistem kelistrikan yang pasokan energi listriknya didapatkan dari sumber energi terbarukan, *distributed generation*, dan *energy storage device* tanpa terhubung dengan grid. Pada penelitian ini, operasi *stand-alone microgrid* menggunakan *photovoltaic* (PV) dan *wind turbine* (WT) sebagai pembangkit energi listrik pada sistem ini. Untuk mempertahankan utilitas ketika PV dan WT tidak dapat memasok energi listrik, sistem ini menggunakan baterai sebagai media penyimpanan energi dan *diesel engine* (DE) sebagai *back-up*. Batasan SOC baterai diperhatikan dalam operasi sistem ini, baik pada kondisi *charging* maupun *discharging* sehingga rugi umur baterai dapat diminimalkan. Operasi optimum pada sistem ini digunakan untuk meminimalkan biaya pembangkitan dan rugi umur baterai. Penyelesaian operasi optimum pada sistem ini menggunakan metode *self-adaptive modified firefly algorithm* (SAMFA). Sebagai pembandingan metode ini, penyelesaian operasi optimum pada sistem ini menggunakan *firefly algorithm* (FA) dan *particle swarm optimization* (PSO).

Berdasarkan simulasi, hasil operasi optimum menggunakan metode SAMFA telah dibandingkan dengan PSO dan FA. Dari hasil tersebut, diketahui bahwa metode SAMFA memiliki nilai fitness yang paling rendah bila dibandingkan dengan FA dan PSO, yaitu 6,29 dengan total biaya pembangkitan sebesar Rp4.164.718,53 dan rugi umur baterai 0,53% pada studi kasus I. Sedangkan pada studi kasus II diperoleh nilai fitness sebesar 9,634 dengan total biaya pembangkitan sebesar Rp8.472.157,31 dan rugi umur baterai sebesar 0,58%.

**Kata kunci:** biaya pembangkitan, multiobjektif, rugi umur baterai, *stand-alone microgrid*,

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# **OPERATION OPTIMIZATION STAND-ALONE MICROGRID USING SELF ADAPTIVE MODIFIED FIREFLY ALGORITHM CONSIDERING LIFETIME CHARACTERISTICS OF BATTERY**

By : Aprilely Ajeng Fitriana  
Student Identity Number : 2213 201 022  
Supervisor : 1. Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc, Ph.D.  
2. Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, M.T.

## **ABSTRACT**

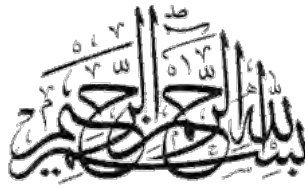
Stand-alone microgrid is an electrical system that supplies electrical energy obtained from renewable energy sources, distributed generation, and energy storage device without connecting to the grid. In this research, operation of stand-alone microgrid using photovoltaic (PV) and wind turbine (WT) as an electric energy generator in this system. To maintain the utility when PV and WT cannot supply electric energy, this system uses battery as energy storage medium and diesel engine (DE) as a back-up. Boundary of SOC battery SOC noted in this system operation, both the charging and discharging conditions. So, the battery life loss can be minimized. Operation optimization of this system is used to minimize the generation cost and battery life loss. Operation optimization solution on this system using the method of self-adaptive algorithm modified firefly (SAMFA). As comparison of this method, operation optimization solution of this system using the firefly algorithm (FA) and particle swarm optimization (PSO).

Based on the simulation, operation optimization results using SAMFA method has been compared by PSO and the FA. From these results, it is known that the method SAMFA has the lowest fitness value than FA or PSO. In study case I, the best fitness value result of this method is 6.29, Rp4,164,718.53 generation cost, and 0.53% life loss battery. In study case II, the best fitness value result of this method is 9,634, Rp8,472,157.31 generation cost, and 0.58% life loss battery.

**Key words:** cost, multiobjective, life loss battery, stand-alone microgrid

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## KATA PENGANTAR



Syukur Alhamdulillah saya panjatkan kehadiran Allah SWT yang senantiasa melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya sehingga saya mampu menyelesaikan tesis yang berjudul:

**OPERASI OPTIMUM *STAND-ALONE MICROGRID*  
MENGUNAKAN METODE *SELF ADAPTIVE MODIFIED*  
*FIREFLY ALGORITHM* DENGAN MEMPERTIMBANGKAN  
KARAKTERISTIK UMUR BATERAI**

Penulisan tesis ini dibuat dengan maksud untuk memenuhi salah satu persyaratan untuk menyelesaikan studi S2 pada bidang studi Teknik Sistem Tenaga Jurusan Teknik Elektro ITS.

Dalam menyelesaikan tesis dan studi S2 ini, banyak pihak yang turut membantu, memberi dukungan, serta semangat kepada penulis. Untuk itu, saya ucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Kedua orang tua saya yang telah memberikan dukungan dan do'a yang terus menerus mengalir kepada penulis hingga detik-detik terakhir penyelesaian Tesis ini
2. Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc, Ph.D dan Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT selaku dosen pembimbing tesis atas bimbingan, perhatian, dan berbagai hal lain yang sudah dibagikan kepada penulis
3. Prof.Dr.Eng.Imam Robandi, MT., Dr. Rony Seto Wibowo, ST.,MT., Dr. Ardyono Priyadi, ST.,M.Eng, dan Dr. Dimas Anton Asfani, ST., MT. selaku penguji tesis atas masukan yang telah diberikan kepada penulis
4. Seluruh dosen Bidang Sistem Tenaga Jurusan teknik Elektro yang telah memberikan bimbingan dan pengajaran kepada penulis



5. Sahabatku, Echa, partner diskusi, partner kuliner, partner galau tesis, partner curhat, dan masih banyak lagi yang tidak bisa penulis tuliskan satu per satu di sini. Terima kasih atas 2 tahun yang penuh dengan “sesuatu”.
6. Teman-teman S2 Teknik Sistem Tenaga 2013 lain, khususnya untuk Mas Yanuar yang selalu siap sedia berbagi ilmu, Kiki yang sering menemani malam-malam di Lab, Teguh yang selalu siap jadi sie transport dadakan, Ibu Nur yang semangatnya selalu menginspirasi penulis.
7. Pak Yanto, Pak Umen, Risqi Ervani, Sepan, Didit, Bu Rosidah dan member Lab. SSTL yang sudah banyak berbagi tawa, canda, dan masukan-masukan yang membantu penulis dalam menyelesaikan tesis ini
8. Mbak Gita, Dara, Mbak Rini, Milan, dan penghuni kost Keputih I/20 lain yang telah berbagi suka duka, kertas, tinta, makanan, dan masih banyak lagi.
9. Arif, Mbak Nisa, Pak Made, Bu Irma, dan masih banyak lagi yang tidak dapat penulis sebutkan satu-satu di sini.

Besar harapan penulis agar tesis ini dapat memberikan manfaat dan masukan bagi pembaca. Penulis menyadari tesis ini masih jauh dari kesempurnaan, oleh karena itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun untuk pengembangan kearah yang lebih baik.

Surabaya, 1 Juli 2015

Penulis

## DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	i
ABSTRAK	iii
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	
DAFTAR SIMBOL	
 <b>BAB 1 PENDAHULUAN</b>	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan dan Manfaat Penelitian	3
1.5 Kontribusi Penelitian	3
 <b>BAB 2 DASAR TEORI DAN KAJIAN PUSTAKA</b>	
2.1 Sistem Kelistrikan <i>Stand-alone Microgrid</i>	5
2.2 <i>Battery Energy Storage System</i> pada <i>Stand-alone Microgrid</i>	7
2.3 Pemodelan Operasi Optimum Pembangkit pada <i>Stand-alone Microgrid</i>	7
2.4 <i>Particle Swarm Optimization (PSO)</i>	15
2.5 <i>Self Adaptive Modified Firefly Algorithm (SAMFA)</i>	17
 <b>BAB 3 PEMODELAN SISTEM DAN IMPLEMENTASI ALGORITMA</b>	
3.1 Penerapan Sistem Kelistrikan <i>Stand-alone Microgrid</i>	25
3.2 Pemodelan Optimasi Pembangkit pada <i>Stand-Alone Microgrid</i>	28
3.3 Strategi Operasi Optimum untuk Meminimalkan Biaya Pembangkitan dan Rugi Umur Baterai	28
3.4 Penyelesaian <i>Multiobjective</i> Menggunakan Metode PSO	29
3.5 Penyelesaian <i>Multiobjective</i> Menggunakan Metode FA	30
3.6 Penyelesaian <i>Multiobjective</i> Menggunakan Metode SAMFA	31
 <b>BAB 4 HASIL SIMULASI DAN ANALISA DATA</b>	
4.1 Karakteristik Pembangkit	33
4.2 Karakteristik Beban	36
4.3 Parameter Pembangkit	38
4.4 Simulasi Pengaturan Daya pada <i>Stand-Alone Microgrid</i>	38
4.5 Simulasi Operasi Optimum pada <i>Stand-Alone Microgrid</i>	45

## **BAB 5 PENUTUP**

5.1 Kesimpulan	63
5.2 Saran	64

DAFTAR PUSTAKA	65
----------------	----

INDEKS	69
--------	----

LAMPIRAN	73
----------	----

BIOGRAFI PENULIS	87
------------------	----

## DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Komponen Pembangkit dari Sistem Stand-alone Microgrid	25
Tabel 4.1	Beban IEEE 30 Bus Modifikasi Selama 24 Jam	37
Tabel 4.2	Parameter Pembangkit	38
Tabel 4.3	Status ON-OFF Pembangkit pada Studi Kasus I	40
Tabel 4.4	Status ON-OFF Pembangkit pada Studi Kasus II	42
Tabel 4.5	Hasil Simulasi dengan Satu Fungsi Objektif pada Studi Kasus I	45
Tabel 4.6	Daya Pembangkitan, Beban, dan Losses 24 Jam pada Studi Kasus I Metode PSO	46
Tabel 4.7	Daya Pembangkitan, Beban, dan Losses 24 Jam pada Studi Kasus I	48
Tabel 4.8	Penyelesaian Multiobjective Menggunakan Metode PSO pada Studi Kasus I	49
Tabel 4.9	Daya Pembangkitan, Beban, dan Losses 24 Jam pada Studi Kasus II Metode PSO	50
Tabel 4.10	Penyelesaian Multiobjective Menggunakan Metode PSO pada Studi Kasus II	51
Tabel 4.11	Daya Pembangkitan, Beban, dan Losses 24 Jam pada Studi Kasus I Metode FA	53
Tabel 4.12	Penyelesaian Multiobjective Menggunakan Metode FA pada Studi Kasus I	53
Tabel 4.13	Daya Pembangkitan, Beban, dan Losses 24 Jam pada Studi Kasus II Metode FA	55
Tabel 4.14	Penyelesaian Multiobjective Menggunakan Metode FA pada Studi Kasus II	56
Tabel 4.15	Daya Pembangkitan, Beban, dan Losses 24 Jam pada Studi Kasus I Metode SAMFA	57
Tabel 4.16	Penyelesaian Multiobjective Menggunakan Metode SAMFA pada Studi Kasus I	58

Tabel 4.17	Daya Pembangkitan, Beban, dan Losses 24 Jam pada Studi Kasus II Metode SAMFA	60
Tabel 4.18	Penyelesaian Multiobjective Menggunakan Metode SAMFA pada Studi Kasus II	60
Tabel 4.19	Perbandingan Hasil Simulasi Multiobjective Studi Kasus I	62
Tabel 4.20	Perbandingan Hasil Simulasi Multiobjective Studi Kasus II	62

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	<i>Stand-alone microgrid</i>	6
Gambar 2.2	<i>Grid-connected</i>	7
Gambar 2.3	Kurva daya aktual dan modelnya dari AIR403	10
Gambar 2.4	Diagram alir PSO	17
Gambar 2.5	Diagram alir FA dan SAMFA	23
Gambar 3.1	Sistem pengujian IEEE 30 Bus yang telah dimodifikasi	25
Gambar 3.2	Diagram alir implementasi algoritma	26
Gambar 3.3	Diagram alir <i>stand-alone microgrid</i> tiap jam	27
Gambar 4.1	Karakteristik radiasi sinar	33
Gambar 4.2	Karakteristik temperatur	34
Gambar 4.3	Karakteristik kecepatan angin	35
Gambar 4.4	Daya keluaran satu buah PV	36
Gambar 4.5	Daya keluaran WT Selama 24 jam	36
Gambar 4.6	Daya total keluaran dari <i>renewable energy</i>	37
Gambar 4.7	Karakteristik beban <i>microgrid</i> selama 24 jam	37
Gambar 4.8	Perbandingan daya beban dan <i>renewable energy</i>	39
Gambar 4.9	Profil Operasi Sistem <i>Stand-Alone Microgrid</i> pada studi kasus I	41
Gambar 4.10	Perubahan SOC pada studi kasus I	41
Gambar 4.11	Profil operasi sistem <i>stand-alone microgrid</i> pada studi kasus II	44
Gambar 4.12	Perubahan SOC pada studi kasus II	44
Gambar 4.13	Grafik konvergensi biaya pembangkitan pada studi kasus I	46
Gambar 4.14	Grafik konvergensi <i>life loss cost</i> pada studi kasus I	46
Gambar 4.15	Grafik konvergensi biaya pembangkitan pada studi kasus II	47
Gambar 4.16	Grafik konvergensi <i>life loss cost</i> pada studi kasus II	47

Gambar 4.17	Grafik konvergensi pada studi kasus I menggunakan metode PSO	50
Gambar 4.18	Grafik konvergensi pada studi kasus II menggunakan metode PSO	52
Gambar 4.19	Grafik konvergensi pada studi kasus I menggunakan metode FA	54
Gambar 4.20	Grafik konvergensi pada studi kasus II menggunakan metode FA	57
Gambar 4.21	Grafik konvergensi pada studi kasus I menggunakan metode SAMFA	59
Gambar 4.22	Grafik konvergensi pada studi kasus II menggunakan metode SAMFA	61

## DAFTAR SIMBOL

$\alpha$	: koefisien random perpindahan
$\alpha_i, \beta_i$	: nilai random yang tak berbentuk antara [0,1]
$\beta^k$	: koefisien atraktif perpindahan kunang-kunang pada iterasi $k$
$\beta_{max}$	: koefisien atraktif maksimum perpindahan kunang-kunang
$\gamma$	: koefisien absorpsi
$\lambda_{soc}$	: faktor pemberat
$A_c$	: akumulasi energi yang melewati baterai pada waktu tertentu
$A_n$	: koefisien <i>annutization</i>
$A_{total}$	: total energi yang melewati baterai pada satu siklus hidup baterai
$a, b, \text{ dan } c$	: koefisien khusus dari diesel <i>engine</i>
$C_{bl}$	: biaya kerugian akibat umur baterai pada durasi tertentu
$C_{init-bat}$	: biaya awal investasi dari baterai <i>lead-acid</i>
$G_c$	: radiasi aktual (W/m <sup>2</sup> )
$G^E$	: biaya operasional dan perawatan (Rp/kW)
$G_{STC}$	: radiasi saat STC (1000 W/m <sup>2</sup> )
$G(P_m^k)$	: fungsi posisi kunang-kunang ke- $m$
$G(P_n^k)$	: fungsi posisi kunang-kunang ke- $n$
$I^p$	: biaya investasi (Rp/kW)
$k$	: koefisien temperatur untuk daya modul dalam %/°C
$L_{loss}$	: kerugian umur baterai
$N$	: umur dari investasi ( $N = 20$ tahun)
$N_{firefly}$	: jumlah kunang-kunang
$P_{bat}$	: daya baterai (bernilai positif saat <i>discharging</i> dan bernilai negative saat <i>charging</i> )
$P_{bat-min}$	: daya minimum yang tersisa pada baterai
$P_{bat-max}$	: daya maksimal yang ada pada baterai
$P_{cha-max}$	: daya maksimum yang diperbolehkan pada saat <i>charging</i> baterai
$P_{discha-max}$	: daya maksimum yang diperbolehkan pada saat baterai <i>discharging</i>
$P_{die}$	: daya keluaran <i>diesel engine</i>
$P_{die-min}$	: daya minimum yang dibangkitkan <i>diesel engine</i>
$P_{die-max}$	: daya maksimal yang mampu dibangkitkan <i>diesel engine</i>
$P_{gen}$	: total daya yang dibangkitkan sistem
$P_{G,m}^k$	: posisi awal kunang-kunang
$P_{G,m,firefly}^k$	: mutasi individu
$P_{G,m,mut}^k$	: posisi kunang-kunang pada proses mutasi



$P_{G,m,new}^k$	: posisi baru kunang-kunang setelah proses mutasi
$P_{i-min}$	: daya operasi minimum dari pembangkit unit $i$
$P_{i-max}$	: daya operasi maksimum dari pembangkit unit $i$
$P_L$	: total beban sistem
$P_{Loss}$	: total kerugian daya dari sistem
$P_m^k$	: posisi kunang-kunang ke- $m$ pada iterasi ke- $k$
$P_n^k$	: posisi kunang-kunang ke- $n$ pada iterasi ke- $k$
$P_{m,firefly}^k$	: posisi baru kunang-kunang ke- $m$
$P_{n,firefly}^k$	: posisi baru kunang-kunang ke- $n$
$P_{m,firefly}^{k,self-adaptive}$	: posisi baru kunang-kunang dengan proses <i>self-adaptive</i>
$P_{pv}$	: daya keluaran dari modul saat radiasi (W)
$P_{pv-min}$	: daya minimum yang dibangkitkan PV
$P_{pv-max}$	: daya maksimal yang mampu dibangkitkan PV
$P_{ren}$	: daya dari pembangkit <i>renewable energy</i>
$P_{STC}$	: daya maksimum modul saat <i>STC</i> (W)
$P_{wt}$	: daya keluaran dari turbin angin (W)
$P_{wt-min}$	: daya minimum yang dibangkitkan WT
$P_{wt-max}$	: daya maksimal yang mampu dibangkitkan WT
$r$	: rating suku bunga ( $r=0.09$ pada kasus umum)
$r_{mn}^k$	: jarak kunang-kunang ke- $m$ dan kunang-kunang ke- $n$ pada iterasi ke- $k$
$s_n$	: <i>scaling factor</i> untuk <i>objective function</i> ke- $n$
$SOC$	: <i>state of charge</i> baterai
$SOC_{max}$	: batas atas yang diperbolehkan dari kapasitas baterai dalam satuan pu
$SOC_{min}$	: batas bawah yang diperbolehkan dari kapasitas baterai dalam satuan pu
$T_c$	: temperatur sel dalam °C
$T_{STC}$	: referensi temperatur (25°C)
$v_{ac}$	: kecepatan angin aktual (m/s)
$v_{ci}$	: kecepatan <i>cut-in</i> (m/s)
$v_{co}$	: kecepatan <i>cut-out</i> (m/s)
$v_i^k$	: <i>update</i> kecepatan individual $i$ pada iterasi $k$
$v_i^{k+1}$	: <i>update</i> kecepatan individual $i$ pada iterasi sesudahnya ( $k+1$ )
$v_r$	: rating kecepatan angin (m/s)
$w_n$	: <i>weight factor</i> untuk <i>objective function</i> ke- $n$
$x_i^{lbest}$	: individu terbaik dari individual $i$
$x_i^{gbest}$	: global terbaik dari kawanan
$x_i^k$	: individual $i$ pada iterasi $k$

$x_i^{k+1}$  : individu  $i$  pada iterasi sesudahnya ( $k+1$ )

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

*Microgrid* merupakan salah satu sistem kelistrikan dengan pasokan energi listriknya didapatkan dari sumber energi terbarukan, *distributed generation*, dan *energy storage device* (Zhixin, 2014). Sistem ini dapat berjalan dengan baik ketika dihubungkan dengan *grid*, *islanded mode*, ataupun *hybrid mode* (Emiliano, 2013). Sumber energi terbarukan yang digunakan dalam sistem ini memiliki berbagai daya keluaran (Tomaso, 2013). Selain itu, sistem ini juga memiliki nilai energi dan variabel pembebanan yang bervariasi (Zhixin, 2014; Emiliano, 2013).

*Battery energy storage system* dapat digunakan untuk meningkatkan manajemen daya pada *microgrid* yang mencakup sumber energi terbarukan. Sumber energi listrik akan dibangkitkan oleh *photovoltaic* (PV), *wind turbine*, dan *diesel engine* digunakan sebagai *back-up*. *Battery energy storage system* dapat digunakan sebagai sarana untuk menyimpan energi listrik yang dibangkitkan oleh sumber energi terbarukan sekaligus mensuplai daya ke beban ketika sumber energi terbarukan tidak menghasilkan energi listrik. Sehingga penggunaan *diesel engine* sebagai *back up* dapat diminimalkan (Yoash, 2013)

*Battery energy storage system* adalah salah satu bagian utama dalam sistem pembangkit energi yang letaknya terpencil dan membutuhkan perhatian sepenuhnya untuk memastikan efisiensi, keamanan, dan kestabilan operasi pada keseluruhan sistem (Ye, 2014). Pada penelitian-penelitian yang lalu, karakteristik umur dari *battery energy storage system* belum diperhatikan secara detail (Haihua, 2011). *Battery energy storage system* memiliki umur yang relatif pendek dan biaya yang relatif tinggi. Optimisasi secara luas sulit untuk dilakukan dan hasil optimisasi hanya melihat pada satu sisi saja tanpa memperhatikan karakteristik umur baterai, terlebih lagi untuk baterai *lead-acid* yang memiliki banyak tipe dan batasan-batasan yang berbeda. Oleh karena itu, dalam mencari harga operasi yang paling minimal perlu diperhatikan pada *battery energy storage system*. Selain itu juga dibutuhkan penelitian untuk meningkatkan utilitas dari sumber energi terbarukan dan pada saat

yang bersamaan juga digunakan untuk memperpanjang penggunaan umur *battery energy storage system* pada waktu yang sama (Bo, 2013).

Sistem manajemen energi ini akan diterapkan sebagai kontrol optimal perangkat penyimpanan energi pada *microgrid*. Energi yang tersimpan akan dikendalikan agar didapatkan keseimbangan daya yang dibangkitkan oleh sumber-sumber energi terbarukan dengan kebutuhan energi pada *microgrid*. Selain itu, model optimisasi yang terdiri dari biaya rugi-rugi yang dikarenakan oleh umur baterai, biaya operasi dan pemeliharaan, biaya bahan bakar, dan *environmental cost* disusun agar mendapatkan parameter-parameter operasi yang optimal. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan pengoperasian paling optimum pada *microgrid* berdasarkan karakteristik umur baterai. Optimisasi dilakukan untuk meminimalkan biaya pembangkitan dan rugi umur baterai dengan menggunakan metode *self-adaptive modified firefly*.

## 1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan dalam penelitian ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Operasi optimum dilakukan untuk meminimalkan biaya pembangkitan dan rugi umur baterai
2. Penggunaan metode *self-adaptive modified firefly algorithm* untuk penyelesaian operasi optimum
3. Penggunaan metode *particle swarm optimization* dan *firefly algorithm* untuk penyelesaian operasi optimum sebagai pembanding

## 1.3 Batasan Masalah

Permasalahan pada penelitian ini dibatasi oleh hal-hal berikut:

1. Fungsi objektif yang digunakan adalah meminimalkan biaya pembangkitan dan rugi umur baterai
2. Jenis pembangkit yang digunakan adalah *photovoltaic*, *wind turbine*, *diesel engine*, dan baterai
3. Baterai digunakan pada saat *photovoltaic* dan *wind turbine* tidak dapat mensuplai beban
4. Penggunaan *diesel engine* sebagai *back up*

#### 1.4 Tujuan dan Manfaat Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mendapatkan nilai pengoperasian optimum yang dilakukan agar dapat meminimalkan biaya pembangkitan dan rugi umur bateraai.
2. Menyelesaikan pengoperasian optimum menggunakan metode *self adaptive modified firefly algorithm*
3. Menyelesaikan pengoperasian optimum menggunakan metode *particle swarm optimization* dan *firefly algorithm* sebagai pembanding

#### 1.5 Kontribusi Penelitian

Bo Zhao (2013) menjelaskan bahwa *battery energy storage system* adalah salah satu bagian utama dalam sistem pembangkit energi yang memiliki letak terpencil dan membutuhkan perhatian khusus untuk memastikan efisiensi, keamanan, dan kestabilan operasi pada keseluruhan sistem. *Battery energy storage system* cenderung memiliki umur yang relatif pendek dan biaya yang relatif tinggi. Optimisasi secara luas sulit untuk dilakukan dan hasil optimisasi hanya melihat pada satu sisi saja tanpa memperhatikan karakteristik umur baterai, terlebih lagi untuk baterai *lead-acid* yang memiliki banyak tipe dan batasan-batasan yang berbeda. Hal ini berdampak pada biaya operasi baterai yang meningkat. Oleh karena itu, dalam mencari biaya operasi yang paling minimal perlu diperhatikan pula karakteristik umur pada *battery energy storage system*. Penelitian ini dilakukan untuk meningkatkan utilitas dari sumber energi terbarukan dan untuk memperpanjang penggunaan umur *battery energy storage system* pada waktu yang sama. Optimisasi dilakukan untuk meminimalkan biaya pembangkitan dan memaksimalkan lama penggunaan dari baterai dengan menggunakan metode *nondominated sorting genetic algorithm*.

Kontribusi dalam penelitian ini adalah melakukan optimisasi untuk meminimalkan biaya pembangkitan dan rugi umur baterai dengan menggunakan metode *self-adaptive modified firefly algorithm*. Metode ini belum dibahas dalam referensi ini.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **BAB 2**

### **DASAR TEORI DAN KAJIAN PUSTAKA**

Dalam penelitian-penelitian yang berkembang dewasa ini, sumber energi tidak terbarukan (fosil) ternyata memunculkan masalah-masalah di bidang ekonomi, lingkungan, dan sosial. Hal ini disebabkan oleh permintaan bahan bakar fosil yang terus menerus meningkat. Tanpa tindakan tegas, permintaan tersebut akan meningkatkan kekhawatiran atas keamanan pasokan energi dan emisi. Penggunaan energi dan emisi ini diperkirakan akan meningkat dua kali lipat pada tahun 2050. Untuk menyelesaikan permasalahan ini, mulai dikembangkan penelitian-penelitian mengenai efisiensi energi, sumber energi terbarukan, penangkapan dan penyimpanan karbon, tenaga nuklir dan teknologi transportasi baru yang ramah lingkungan.

Pengembangan sumber energi terbarukan diharapkan dapat menyelesaikan masalah lingkungan global, termasuk pengurangan emisi gas rumah kaca, penciptaan kerangka dan pengaturan tujuan pada skala global saat ini sedang diteliti. Dalam hal ini, penerapan energi terbarukan dianggap efektif, baik untuk menyelesaikan masalah lingkungan. Sementara itu, adopsi masa energi terbarukan menimbulkan kekhawatiran baru mengenai kemungkinan pengaruh yang berbahaya terhadap sistem tenaga listrik (Taher, 2012)

#### **2.1. Sistem Kelistrikan *Stand-alone Microgrid***

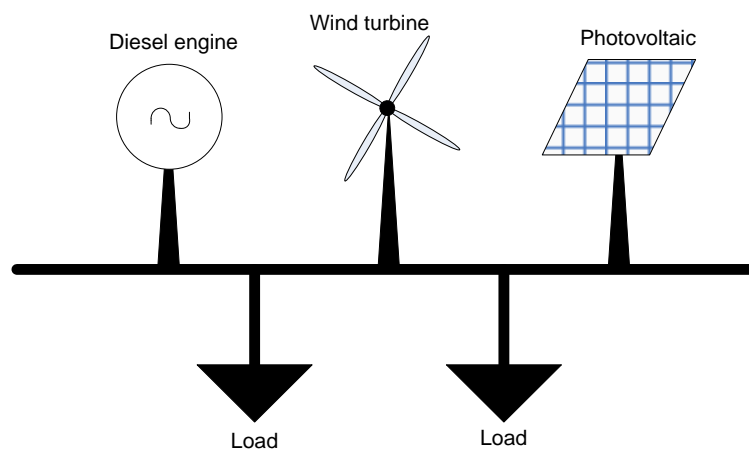
*Microgrid* merupakan salah satu sistem kelistrikan di mana pasokan energi listriknya didapatkan dari sumber energi terbarukan (Zhixin, 2014). Sistem ini terdiri dari beberapa kelompok beban, *distributed generator*, dan *energy storage device* yang dapat berjalan dengan baik ketika dihubungkan dengan grid, *islanded mode*, ataupun *hybrid mode* (Emiliano, 2013). Sumber energi terbarukan yang digunakan dalam sistem ini memiliki berbagai daya keluaran (Tomaso, 2013). Selain itu, sistem ini juga memiliki nilai energi dan level pembebanan yang bervariasi (Zhixin, 2014; Emiliano, 2013) Sistem *microgrid* memiliki beberapa karakteristik sebagai berikut:



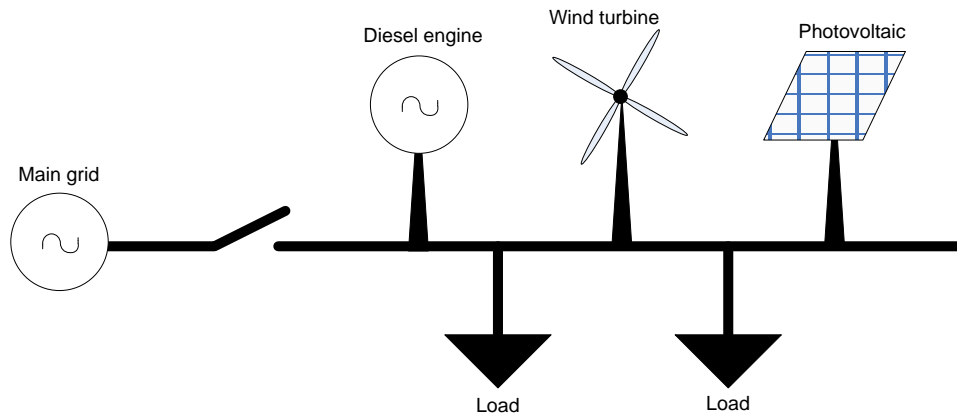
1. Dapat diaplikasikan untuk daerah-daerah khusus yang membutuhkan banyak pasokan listrik
2. Konfigurasi dari sumber daya terdistribusi dan jaringan pembangkit daya skala kecil
3. Pada sisi sistem pembangkit daya mampu beroperasi secara terpisah dari *pre-existing* sistem pembangkit daya skala kecil.
4. Dapat dikonfigurasi dengan grid atau berdiri sendiri
5. Penggunaan teknologi informasi dan komunikasi untuk mengintegrasikan pengaturan pada banyak sumber daya yang terdistribusi dan beban.

Konfigurasi sistem *microgrid* telah dikembangkan dan diaplikasikan pada pulau-pulau terpencil. Masalah-masalah yang melibatkan sistem independensi ketika sumber energi terbarukan dalam skala besar diperkenalkan, dan metode untuk menyelesaikan masalah-masalah tersebut (Takehiko, 2004)

Sistem kelistrikan *microgrid* mempunyai dua mode operasi, yaitu *stand-alone* dan *grid-connected*. Mode operasi *stand-alone microgrid* merupakan mode operasi dimana sistem tidak terhubung ke *main grid* (PLN). Sedangkan mode operasi *grid-connected* adalah mode operasi dimana sistem terhubung ke *main grid* (PLN). Pada mode operasi *stand-alone*, pembangkit yang ada beroperasi secara mandiri dalam memenuhi kebutuhan sistem. Mode operasi ini menekankan pada stabilitas sistem terutama frekuensi dan tegangan. Sistem ini sangat cocok diaplikan pada daerah terpencil dimana jaringan PLN sulit diaplikasikan.



Gambar 2.1 *Stand-alone microgrid*



Gambar 2.2. *Grid-connected*

## 2.2. Battery Energy Storage System pada Stand-alone Microgrid

*Battery energy storage system* adalah salah satu bagian utama dalam sistem pembangkit energi yang letaknya terpencil dan membutuhkan perhatian khusus untuk memastikan efisiensi, keamanan, dan kestabilan operasi pada keseluruhan sistem. *Battery energy storage system* ini dapat digunakan untuk meningkatkan manajemen daya pada *microgrid* yang mencakup sumber energi terbarukan. Sumber energi listrik akan dibangkitkan oleh *photovoltaic* (PV), *wind turbine*, dan *diesel engine* digunakan sebagai *back-up*. *Battery energy storage system* dapat digunakan sebagai sarana untuk menyimpan energi listrik yang dibangkitkan oleh sumber energi terbarukan sekaligus mensuplai daya ke beban ketika sumber energi terbarukan tidak menghasilkan energi listrik. Sehingga penggunaan *diesel engine* sebagai *back up* dapat diminimalkan (Yoash, 2013)

## 2.3. Pemodelan Optimisasi Pembangkit pada Stand-alone Microgrid

Perbedaan sistem kelistrikan pada *stand-alone microgrid* dengan jaringan kelistrikan konvensional yang menonjol adalah pembangkitan listriknya. *Stand-alone microgrid* menggunakan teknologi dengan memanfaatkan sumber energi terbarukan. Pada penelitian ini, beban pada *stand-alone microgrid* dibangkitkan oleh beberapa pembangkit, yaitu *photovoltaic* (PV), turbin angin (*wind turbine*), *diesel engine*, dan baterai.

Dalam optimisasi sistem tenaga listrik hal yang selalu dipertimbangkan adalah *economic dispatch* yang memperhitungkan *generation cost*. Sistem kelistrikan *microgrid* memiliki dua jenis pembangkitan berdasarkan biaya pembangkitannya yakni pembangkitan dengan energi terbarukan dan pembangkitan dengan *diesel engine*. Menggunakan energi terbarukan tentu memiliki keunggulan disisi biaya pembangkitan tetapi lemah disisi waktu pembangkitan dan daya hasil pembangkitan yang *intermittent*. Maka perlu media penyimpan energi berupa baterai untuk menyimpan energi yang telah dihasilkan. Harga baterai untuk penyimpanan energi relatif cukup mahal, sehingga perlu adanya optimisasi umur baterai. Agar investasi dari penggunaan baterai dapat optimal.

*Economic dispatch* merupakan pembagian pembebanan pada tiap pembangkit untuk bekerja secara ekonomis pada beban tertentu. Setiap pembangkit atau generator memiliki karakteristik yang berbeda-beda, sehingga berpengaruh pada fungsi kebutuhan dan konsumsi biaya bahan bakar pembangkitannya. Pada sub bab ini akan dibahas pemodelan fungsi-fungsi biaya yang digunakan pada *stand-alone microgrid* (Faisal, 2008).

### **2.3.1. Model Optimisasi Photovoltaic (PV)**

*Photovoltaic* (PV) merupakan pembangkit sumber energi terbarukan yang mampu merubah cahaya sinar matahari menjadi energi listrik. Dengan kata lain, PV adalah teknologi berdasarkan semi-konduktor dalam kondisi padat yang mengkonversi energi cahaya matahari secara langsung menjadi energi listrik, tanpa ada bagian yang berputar, tidak mengeluarkan gas buangan, PV juga merupakan pembangkit yang sangat menarik dan cocok digunakan untuk pembangkit pada jaringan distribusi perkotaan dikarenakan ukurannya yang relatif kecil dan tidak ada kebisingan saat dioperasikan.

Karakteristik dari PV pada saat beroperasi tidak selalu sama dengan kondisi standar ( $1000 \text{ W/m}^2$ , temperatur sel  $25^\circ\text{C}$ ) maka pengaruh radiasi dan temperatur akan mempengaruhi karakteristik PV. Pemodelan dilakukan berdasarkan pengaruh dari radiasi matahari dan temperatur lingkungan pada karakteristik PV. Modul sel surya diuji dalam *Standard Test Condition* (STC). Daya output modul dapat dihitung menggunakan persamaan (2.1).

$$P_{pv} = P_{STC} \frac{G_c}{G_{STC}} (1 + k(T_c - T_{STC})) \quad (2.1)$$

Dalam tugas akhir ini, digunakan modul sel surya SOLAREX MSX-83. Karakteristik dari modul ini adalah (Primaditya, 2013) :

Daya maksimum saat <i>STC</i> ( $P_{STC}$ )	= 83 W
Tegangan saat daya maksimum	= 17,1 V
Arus saat daya maksimum	= 4,85 A
Arus <i>short-circuit</i> saat <i>STC</i>	= 5,27 A
Tegangan <i>open-circuit</i> saat <i>STC</i>	= 21,2 V
Koefisien temperatur untuk daya ( $k$ )	= -0,5

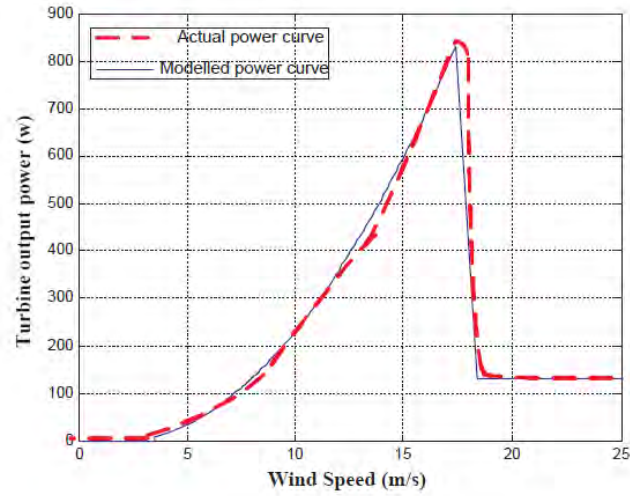
Fungsi biaya dari *photovoltaic* dipengaruhi oleh biaya investasi dari pembelian serta instalasi dari peralatan dan juga dipengaruhi biaya operasi dan perawatan dari *photovoltaic* terhadap daya keluaran PV (Norberto, 2010). Fungsi biaya tersebut dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2.2) (Noel, 2011)

$$F(P_{pv}) = aI^p P_{pv} + G^E P_{pv} \quad (2.2)$$

$$a = \frac{r}{[1 - (1 + r)^{-N}]} \quad (2.3)$$

### 2.3.2. Model Optimisasi *Wind turbine* (WT)

Pembangkit turbin angin merupakan suatu sistem yang mengubah angin menjadi energi listrik. Angin yang berhembus akan menggerakkan kipas yang di kopel dengan generator, sehingga menghasilkan energi listrik. Dalam merancang model *wind turbine*, dua faktor penting yang perlu diperhatikan, yaitu ketersediaan angin dan daya yang dibangkitkan oleh *wind turbine* itu sendiri. Keluaran daya dari turbin angin merupakan fungsi dari kecepatan angin. Untuk memodelkan performansi dari turbin angin, kurva daya harus diperoleh. Dalam penelitian ini, digunakan turbin angin AIR403. Kurva daya dari turbin angin ini ditunjukkan oleh Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Kurva daya aktual dan modelnya dari AIR403

Dari model kurva daya tersebut, dapat diperoleh persamaan (2.4).

$$\begin{cases} P_{wt} = 0, & v_{ac} < v_{ci} \\ P_{wt} = av_{ac}^2 + bv_{ac} + c, & v_{ci} \leq v_{ac} \leq v_r \\ P_{wt} = 130, & v_r \leq v_{ac} \leq v_{co} \end{cases} \quad (2.4)$$

dengan:

$P_{wt}$  : daya keluaran dari turbin angin (W)

$v_{ci}$  : kecepatan *cut-in* (m/s)

$v_{co}$  : kecepatan *cut-out* (m/s)

$v_r$  : rating kecepatan angin (m/s)

$v_{ac}$  : kecepatan angin aktual (m/s)

Untuk memodelkan performansi dari turbin angin, persamaan matematis dari kurva daya harus diperoleh. Berdasarkan kurva di atas, didapatkan parameter sebagai berikut (Faisal, 2008):

$$P_{wt,r} = 130$$

$$v_{ci} = 3,5$$

$$v_{co} = 18$$

$$v_r = 17,5$$

Fungsi biaya dari turbin angin adalah seperti pada persamaan (2.5), dengan mempertimbangkan biaya investasi dari pembelian peralatan dan biaya operasi dan perawatan dari turbin angin (Noel, 2011). Fungsi biaya tersebut dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$F(P_{wt}) = aI^P P_{wt} + G^E P_{wt} \quad (2.5)$$

$$a = \frac{r}{[1-(1+r)^{-N}]} \quad (2.6)$$

### 2.3.3. Model Optimisasi Baterai

*Battery bank* merupakan perangkat elektrokimia yang menyimpan energi dari sumber AC atau DC lainnya untuk digunakan lagi. Daya dari *battery* dibutuhkan ketika *microsource* tidak cukup untuk *supply* beban, atau ketika kedua *microsource* dan grid utama gagal memenuhi permintaan total beban. Di lain pihak, energi disimpan ketika suplai dari *microsource* melebihi total beban (Tianpei, 2014).

Strategi yang dilakukan untuk melakukan penghematan adalah mengatur penggunaan baterainya, hal tersebut juga akan berimbas pada kerja sistem kelistrikan secara keseluruhan. Pada setiap waktu *state of charge* (SOC) dari baterai harus memenuhi persyaratan berikut :

$$SOC_{min} \leq SOC \leq SOC_{max} \quad (2.7)$$

$$P_{cha\_max} \leq P_{bat} \leq P_{discha\_max} \quad (2.8)$$

Besar nilai SOC pada waktu tertentu ditentukan oleh SOC awal dan daya baterai selama periode tersebut (Faisal, 2008). Secara matematis ditunjukkan oleh persamaan (2.9).

$$SOC_{(t+\Delta t)} = SOC_t - P_{bat,t} \times \frac{\Delta t}{C_{bat}} \quad (2.9)$$

Fungsi biaya baterai dipengaruhi oleh biaya investasi dari pembelian serta instalasi dari peralatan dan juga dipengaruhi biaya operasi dan perawatan baterai terhadap daya keluaran baterai (Noel, 2011). Fungsi biaya tersebut dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2.10)

$$F(P_{bat}) = An \times I^p bat + G^E P_{bat} \quad (2.10)$$

$$An = \frac{r}{[1-(1+r)^{-N}]} \quad (2.11)$$

*Life loss cost of battery* adalah biaya kerugian akibat berkurangnya umur baterai. Pada umumnya parameter yang digunakan untuk mengukur level dari kerugian umur baterai adalah akumulasi energi yang masuk (*charge*) atau keluar (*discharge*) dari baterai tersebut (Bo, 2013). Hal ini dapat diformulasikan dalam persamaan (2.12).

$$L_{loss} = \frac{A_c}{A_{total}} \quad (2.12)$$

Dari sebuah data pembuatan baterai lead-acid menyatakan bahwa Q kapasitas baterai mampu dilewati sampai dengan 390Q energi selama periode hidup baterai.

$A_c$  menunjukkan nilai dari SOC saat beroperasi dan energi aktual yang melewati baterai. Hal tersebut dapat diformulasikan dalam persamaan (2.13).

$$A_c = \lambda_{soc} \times A_c' \quad (2.13)$$

Nilai  $\lambda_{soc}$  bisa didapatkan dari persamaan (2.14).

$$\lambda_{soc} = k \times SOC + d \quad (2.14)$$

Dari persamaan (2.14), nilai  $k$  dan  $d$  didapat dari mencari gradien persamaan linier dari kurva hubungan antara faktor pemberat dan nilai SOC dari baterai lead-acid (Bo, 2013). Maka didapatkan nilai  $k = -1,5$  dan  $d = 2,07$ .

Biaya kerugian akibat umur baterai dapat dinyatakan dalam persamaan (2.15).

$$C_{bl} = L_{loss} * C_{init-bat} \quad (2.15)$$

#### 2.3.4. Model Optimisasi *Diesel engine*

*Diesel engine* merupakan pembangkit yang sudah dikembangkan lebih dari 100 tahun yang lalu. Pembangkit ini menggunakan bahan bakar fosil yang artinya bukan termasuk pada pembangkit energi terbarukan. Sehingga pada jaring microgrid ini, *diesel engine* akan dinyalakan terakhir pada saat tidak ada *renewable energy* dan atau pembangkitan dari *renewable* kurang untuk menanggung beban. Meski begitu pembangkit ini banyak digunakan karena memiliki instalasi yang mudah dan keandalan yang tinggi.

*Diesel engine* adalah jenis yang paling umum digunakan dalam teknologi microgrid saat ini (Bo, 2013). Biaya operasi dari sistem dapat dinyatakan sebagai fungsi daya keluaran dan dapat dimodelkan dengan polinomial kuadrat seperti yang ditunjukkan oleh persamaan (2.16).

$$F(P_{die}) = a + b P_{die} + c P_{die}^2 \quad (2.16)$$

Fungsi biaya generator diperoleh dari titik-titik data yang diambil selama pengujian “*heat run*”, ketika input dan output diukur sebagai unit yang secara perlahan melalui zona operasinya. Besarnya nilai  $a$ ,  $b$ , dan  $c$  diberikan oleh pabrik yang mana nilai-nilainya dapat diketahui dari datasheet *diesel engine* itu sendiri (Allen, 1996).

#### 2.3.5. *Constraints*

Terdapat *constrain* yang perlu diperhatikan dalam optimisasi *economic dispatch* dan *life loss cost battery* yaitu keseimbangan daya sebagai *essential*



*constrain* dan kapasitas pembangkit. Keseimbangan daya sebagai *essential constrain* dirumuskan dalam persamaan (2.17).

$$P_{gen} = P_L + P_{Loss} \quad (2.17)$$

Jika *constrain* utama ini tidak dipenuhi maka sistem kelistrikan ini akan berubah frekuensinya dan mampu merusak peralatan listrik. Pada penelitian ini  $P_{gen}$  dibangkitkan oleh pembangkit *renewable energy*, baterai, dan *diesel engine*. *Renewable energy* yang digunakan adalah PV dan turbin angin. Dapat dituliskan berdasarkan persamaan (2.18) dan (2.19).

$$P_{ren} = P_{pv} + P_{wt} \quad (2.18)$$

$$P_{gen} = P_{ren} + P_{bat} + P_{die} \quad (2.19)$$

Selain keseimbangan daya, kapasitas pembangkit juga perlu diperhatikan. Batasan kapasitas pembangkit yang digunakan dirumuskan dalam persamaan (2.20).

$$P_{i-min} \leq P_i \leq P_{i-max} \quad (2.20)$$

Terdapat empat pembangkit yang tersambung dalam sistem microgrid ini yaitu PV, turbin angin, *diesel engine*, dan baterai. Pembangkit tersebut mempunyai kapasitas daya yang berbeda-beda (Bo, 2013). Fungsi pertidaksamaan dari keempat pembangkit itu ditunjukkan dalam persamaan (2.21 – 2.24).

$$P_{pv-min} \leq P_{pv} \leq P_{pv-max} \quad (2.21)$$

$$P_{wt-min} \leq P_{wt} \leq P_{wt-max} \quad (2.22)$$

$$P_{bat-min} \leq P_{bat} \leq P_{bat-max} \quad (2.23)$$

$$P_{die-min} \leq P_{die} \leq P_{die-max} \quad (2.24)$$

#### 2.4. Particle Swarm Optimization (PSO)

PSO adalah teknik penentuan populasi berdasarkan optimisasi stokastik yang dikembangkan oleh Dr. Eberhart dan Dr. Kennedy pada tahun 1995. Teknik penentuan ini terinspirasi oleh perilaku sosial sekawanan burung atau sekawan hewan yang sedang mencari makanan. PSO memiliki beberapa kesamaan dengan teknik komputasi evolusioner seperti pada *Genetic Algorithm* (GA). Inisialisasi sistem didapatkan dari populasi acak dan nilai optimal diperoleh dari generasi yang diperbarui. Namun, PSO sedikit berbeda dengan GA, PSO tidak memiliki operator evolusi seperti *crossover* dan mutasi. Pada PSO, potensi solusi disebut partikel, terbang melalui ruang masalah dengan mengikuti partikel yang optimum (Rahman, 2009).

Partikel menunjukkan seekor burung atau sekawanan burung. Masing-masing partikel melacak di masing-masing koordinat di ruang permasalahan yang berhubungan dengan solusi terbaik (*fitness*). Jika satu partikel menemukan jalan yang terbaik untuk menemukan sumber makanan maka sisa kelompok yang lain akan mengikuti jalan tersebut. Nilai *fitness* yang telah diperoleh disebut  $p_{best}$ . Nilai  $p_{best}$  lain yang didapatkan dari PSO *optimizer* adalah nilai terbaik yang didapatkan oleh partikel di daerah tetangga partikel tersebut. Lokasi ini disebut  $l_{best}$ . Ketika sebuah partikel menganggap bahwa semua populasi sebagai tetangga topologi, sehingga nilai terbaik dijadikan sebagai *global best* dan disebut  $g_{best}$ .

Konsep dari PSO terdiri dari waktu langkah masing-masing, perubahan kecepatan dari masing-masing partikel terhadap  $p_{best}$  dan lokasi  $l_{best}$ . Setiap partikel bergerak dalam ruang tertentu dan akan mengingat jalur dan posisi terbaik sumber makanan yang ditemukan. Setiap partikel ini akan menyampaikan informasi tentang sumber makanan tersebut kepada partikel yang lain. Partikel lain akan menyesuaikan posisi dan kecepatan masing-masing untuk menemukan sumber makanan tersebut. Setiap kawanan memiliki aturan, antara lain sebagai berikut :

1. Sebuah kawanan atau seekor burung tidak berada terlalu dekat dengan kawanan yang lain
2. Sebuah kawanan atau seekor burung mengarahkan arah terbangnya ke arah keseluruhan burung

3. Burung tersebut akan memposisikan diri dengan posisi rata-rata burung lainnya dan menjaga jarak antar burung dalam kawanan tidak terlalu jauh Sehingga PSO dikembangkan dengan urutan berdasarkan aturan diatas :

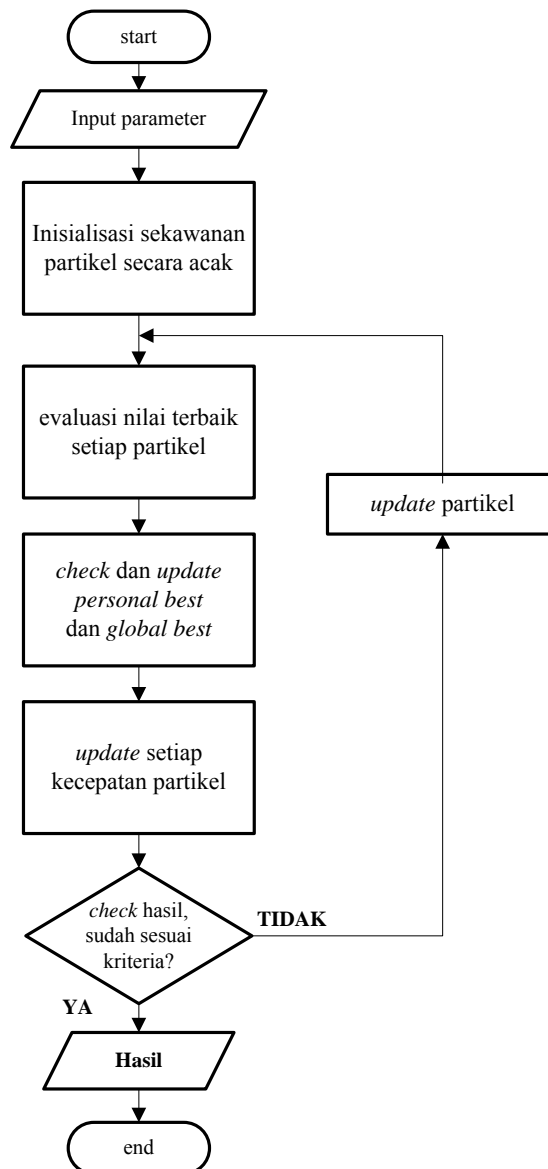
1. Jika seekor burung atau partikel mendekati target atau sumber makanan, maka partikel tersebut akan segera mengirim informasi kepada partikel lainnya dalam kawanan atau *space range* tertentu
2. Partikel lain akan mengikuti arah dari informasi menuju makanan tetapi tidak secara langsung
3. Ada unsur yang tergantung pada pemikiran dari setiap partikel yaitu ingatan tentang jalur yang sudah dilewati pada waktu sebelumnya.

Selanjutnya langkah-langkah diatas akan disimulasikan dalam ruang dan dimensi tertentu dengan jumlah iterasi tertentu. Pada setiap iterasi, posisi partikel akan semakin bergerak kearah sumber makanan yang dituju. Ketika nilai iterasi mencapai maksimum maka iterasi akan berhenti.

Algoritma dari PSO ini yaitu melakukan pencarian secara paralel menggunakan sekelompok individual yang hampir sama untuk teknik optimisasi berbasis *artificial intelligent*. Masing-masing individu bertanggung jawab untuk mendapatkan calon solusi untuk menyelesaikan permasalahan yang ada. Individual-individual dalam suatu kawanan didekati untuk mendapatkan titik optimum dengan mempertimbangkan kecepatan, percobaan sebelumnya, dan percobaan yang dilakukan oleh tetangganya. Dalam sebuah ruang pencarian fisik dengan n-dimensi, posisi dan kecepatan individu  $i$  digambarkan sebagai vektor kecepatan. Dengan menggunakan informasi tersebut, individu  $i$  dan *update* kecepatannya akan dapat dimodifikasi dengan menggunakan persamaan (2.25) dan (2.26). Algoritma dari PSO ini ditunjukkan melalui diagram alir pada Gambar 2.4 (Yamille, 2008).

$$v_i^{k+1} = v_i^k + \alpha_i(x_i^{lbest} - x_i^k) + \beta_i(x_i^{gbest} - x_i^k) \quad (2.25)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (2.26)$$



Gambar 2.4. Diagram alir PSO

## 2.5. Self Adaptive Modified Firefly Algorithm (SAMFA)

### 2.5.1. Original Firefly

*Firefly Algorithm* (FA) adalah suatu *meta-heuristic* algoritma optimisasi berbasis pada populasi yang terinspirasi oleh pergerakan kunang-kunang. Sama halnya dengan algoritma PSO yang memperbarui posisi dengan cara memperbarui kecepatan, pada FA kunang-kunang akan bergerak dari kunang-kunang yang satu

menuju ke kunang-kunang lain yang memiliki intensitas cahaya lebih terang. Pada penyelesaian masalah minimalisasi, kunang-kunang dengan fungsi objektif paling rendah memiliki intensitas cahaya yang paling terang.

FA terdiri dari sejumlah kunang-kunang dan berbagai macam tingkat kecerahan cahaya. Pada penyelesaian ekonomis dispatch, jumlah kunang-kunang ini akan merepresentasikan jumlah pembangkit yang ada pada suatu sistem, sedangkan tingkat kecerahannya merepresentasikan fungsi biaya pembangkitan. Pada setiap iterasi akan dipilih fungsi fitness terbaik sebagai  $best^k$ . Struktur dari masing-masing kunang-kunang dari suatu populasi dapat didefinisikan pada persamaan (2.27)

$$P_{G,m}^k = [P_1^k, P_2^k, \dots, P_m^k] \quad m = 1, \dots, N_{\text{firefly}} \quad (2.27)$$

Setiap elemen dari kunang-kunang ke- $m$  memodifikasi posisinya ke posisi saat ini, jarak *Cartesian* atau *Euclidean* dari  $P_m^k$  untuk masing-masing elemen dari kunang-kunang ke- $n$  yang paling cerah dan digerakkan secara acak. Modifikasi posisi dihitung berdasarkan persamaan (2.28).

$$P_m^k = \begin{cases} \text{if } G(P_n^k) < G(P_m^k) \\ P_m^k + \beta^k (P_n^k - P_m^k) + \alpha^k |P_{\max} - P_{\min}| \left( \text{rand} - \frac{1}{2} \right) \\ \text{else} \\ P_m^k \end{cases} \quad (2.28)$$

$m = 1, \dots, N_{\text{firefly}} \quad n = 1, \dots, N_{\text{firefly}}$

Fungsi atraktif  $\beta^k$  dirumuskan melalui persamaan (2.29).

$$\beta^k = (\beta_{\max}) e^{-\gamma (r_{mn}^k)^2} \quad (2.29)$$

Untuk menghasilkan perbaikan nilai  $\beta^k$  dengan konvergensi algoritma yang paling cepat dan keluar dari *local* optima  $\beta^k$  dapat ditulis dalam persamaan (2.30).

$$\beta^k = (\beta_{max} - \beta_{min})e^{-\gamma(r_{mn}^k)^2} + \beta_{min} \quad (2.30)$$

$$r_{mn}^k = \frac{\|P_n^k - P_m^k\|}{\sqrt{\sum_{i=1}^{NG} (P_{n,i}^k - P_{m,i}^k)^2}} \quad (2.31)$$

Besarnya  $\beta_{max}$  dan  $\gamma$  diset dengan nilai 1. Sedangkan  $\beta_{min}$  mempunyai nilai konstan sebesar 0,2 (Xin-She, 2009).

Perbandingan dengan algoritma evolusioner yang lain, FA memiliki banyak keuntungan untuk digunakan dalam penyelesaian masalah optimisasi nonlinier yang kompleks, seperti masalah *dynamic economic dispatch*. Beberapa keuntungan dari algoritma ini adalah konsep yang sederhana, mudah diimplementasikan, mekanisme stabilitas yang lebih tinggi, dan tidak membutuhkan usaha yang besar untuk eksekusinya. Berdasarkan hubungan tersebut, terkadang konevergensinya tidak cocok karena kunang-kunang terjebak di *local* optimum, atau proses yang lambat dalam pencarian konvergensi algoritma tersebut. Untuk menyelesaikan permasalahan terbut, pada sub bab ini dijelaskan 2 modifikasi utama yang menjelaskan *Self Adaptive Modified Firefly Algorithm* (SAMFA).

### 2.5.2. Strategi Mutasi

Untuk meningkatkan performa dari FA yang asli dan agar keluar dari *local* optima, terciptalah strategi mutasi yg baru. Di setiap tahap dari masing-masing penyelesaian yang ada, 4 faktor  $q_1$ ,  $q_2$ ,  $q_3$ , dan  $q_4$  terpilih secara acak dari populasi yang ada untuk mencakup algoritma pada area tersebut dengan seksama. Akan tetapi untuk keempat vektor yang telah disebutkan tadi memiliki ketentuan  $q_1 \neq q_2 \neq q_3 \neq q_4 \neq m$  membentuk suatu mutasi individu  $P_{G,m,mut}^k$  yang dihasilkan dari persamaan (2.32)

$$P_{G,m,mut}^k = P_{G,q_1,firefly}^k + \left( \begin{array}{c} rand1(.) (1 - rand2(.)) \begin{pmatrix} P_{G,q_2,firefly}^k \\ -P_{G,q_3,firefly}^k \end{pmatrix} \\ + rand3(.) (1 - rand4(.)) (best^k - P_{G,q_3,firefly}^k) \end{array} \right) \quad (2.32)$$

Kemudian vektor mutasi digabungkan dengan  $P_{G,m,\text{firefly}}^k$  yang menghasilkan  $P_{G,m,\text{new}}^k$  yang dirumuskan melalui persamaan (2.33) sampai (2.36).

$$P_{G,m,\text{mut}}^k = [P_{1,\text{mut}}^k, P_{2,\text{mut}}^k, \dots, P_{N_{\text{firefly}},\text{mut}}^k] \quad (2.33)$$

$$P_{G,m,\text{new}}^k = [P_{1,\text{new}}^k, P_{2,\text{new}}^k, \dots, P_{N_{\text{firefly}},\text{new}}^k] \quad (2.34)$$

$$P_{m,\text{new}}^k = [P_{1,\text{new}}^k, P_{2,\text{new}}^k, \dots, P_{NG,\text{new}}^k] \quad (2.35)$$

$$m = 1, \dots, N_{\text{firefly}}$$

$$P_{m,i,\text{new}}^k = \begin{cases} P_{m,i,\text{new}}^k & \text{if}(rand5(.) \leq rand6(.)) \\ P_{m,i,\text{firefly}}^k & \text{else} \end{cases} \quad (2.36)$$

$$m = 1, \dots, N_{\text{firefly}} \quad i = 1, \dots, NG$$

Penyelesaian baru akan menggantikan solusi yang asli berdasarkan fungsi fitnessnya melalui (2.37)

$$P_{m,\text{firefly}}^k = \begin{cases} P_{m,\text{new}}^k & \text{if}(G(P_{m,\text{new}}^k) \leq G(P_{m,\text{firefly}}^k)) \\ P_{m,\text{firefly}}^k & \text{else} \end{cases} \quad (2.37)$$

$$m = 1, \dots, N_{\text{firefly}}$$

Hasil akhir dari keluaran iterasi ke- $k$  akan dijadikan masukan pada iterasi selanjutnya.

Dapat dikatakan bahwa kriteria pemilihan strategi mutasi ini memiliki perbedaan karakteristik yang mencakup kondisi yang berbeda. Hal ini akan memperbaiki penyelesaian dalam skala besar dan kenaikan perbedaan populasi, selain itu juga akan meningkatkan kemampuan pencarian secara global dan local.  $best^k$  digunakan sebagai pemicu untuk memandu perpindahan informasi di antara kunang-kunang yang ada dengan cara yang lebih baik. Akan tetapi, penggabungan yang terlalu cepat mungkin dapat terjadi dalam penyelesaian *local* optima yang sangat besar. Dengan begitu, penggunaan tipe ini pada penghasil fungsi acak dan pemilihan empat kunang-kunang untuk operasi mutasi pada metode SAMFA akan

menghasilkan kecepatan tinggi dan terhindar dari terjebak pada *local* optima pada permasalahan yang lebih kompleks (Taher, 2012).

### 2.5.3. Tuning $\alpha$ dan $\gamma$ Secara *Adaptive* dan *Self-Adaptive*

Terdapat tiga parameter yang digunakan untuk menghasilkan performa FA yang lebih baik. Faktor perpindahan acak ( $\alpha$ ) mengatur dampak gerakan acak dari penyelesaian yang ada dan biasanya dipilih *range* [0, 1]. Koefisien ini sangat efektif untuk meningkatkan performa FA. Nilai  $\alpha$  yang besar akan membuat perpindahan untuk mengeksplorasi solusi yang ada melalui jarak dari tempat yang dicari. Sedangkan nilai  $\alpha$  yang lebih kecil akan memudahkan pencarian local. Koefisien absorpsi ( $\gamma$ ) mengatur pengurangan intensitas cahaya dan biasanya dimulai dari 1. Dengan begitu, perubahan parameter FA ini akan mengubah efektifitas dari algoritma dan pemilihan parameter-parameter ini akan berdampak besar pada performansi dari FA. Pemilihan parameter *adaptive* dan *self-adaptive* direpresentasikan untuk memodifikasi nilai parameter yang ada untuk performa algoritma yang lebih baik. Pada prosedur pengaturan *adaptive*, percobaan dalam sekian kali running algoritma menyebabkan sebuah fungsi heuristic yang dinamik berubah setiap iterasinya. Misal, inertia weight factor PSO yang berkurang sejalanannya waktu. Sedangkan dalam pengaturan *self-adaptive*, parameter-parameter algoritma dikombinasikan dengan demonstrasi dari masing-masing individu dan dipasang sesuai dengan penyelesaian proses optimisasi. Dalam penelitian ini, penambahan pemilihan *adaptive*  $\alpha^k$ , koefisien absorpsi  $\gamma$  diatur secara *self-adaptive* untuk meningkatkan efektifitas dari pendekatan metode.  $\alpha^k$  dipasang secara dinamis pada setiap iterasi menggunakan persamaan (2.38)

$$\alpha^{k+1} = \left( \frac{1}{2k_{max}} \right)^{1/k_{max}} \alpha^k \quad (2.38)$$

Dalam penelitian ini,  $\gamma$  tidak diset dengan nilai konstan seperti original FA. sebagai gantinya,  $\gamma$  digabungkan dalam masalah minimalisasi seperti penjelasan di bawah ini.



Setiap posisi kunang-kunang akan diterima untuk dipasangkan dengan parameternya sendiri melalui prosedur *self-adaptive* dengan menerapkan proses yang sama dengan yang digunakan dalam FA, seperti yang ditunjukkan oleh persamaan (2.27). Variabel baru ini dihubungkan dengan vektor unit pembangkit dengan posisi  $P_m^k$ . Vektor posisi yang baru untuk elemen ini akan dirumuskan pada persamaan (2.39)

$$P_m^{k, self-adaptive} = [P_{m,1}^k \quad P_{m,2}^k \quad \cdots \quad P_{m,NG}^k \quad \gamma_{m,NG+1}^k] \quad (2.39)$$

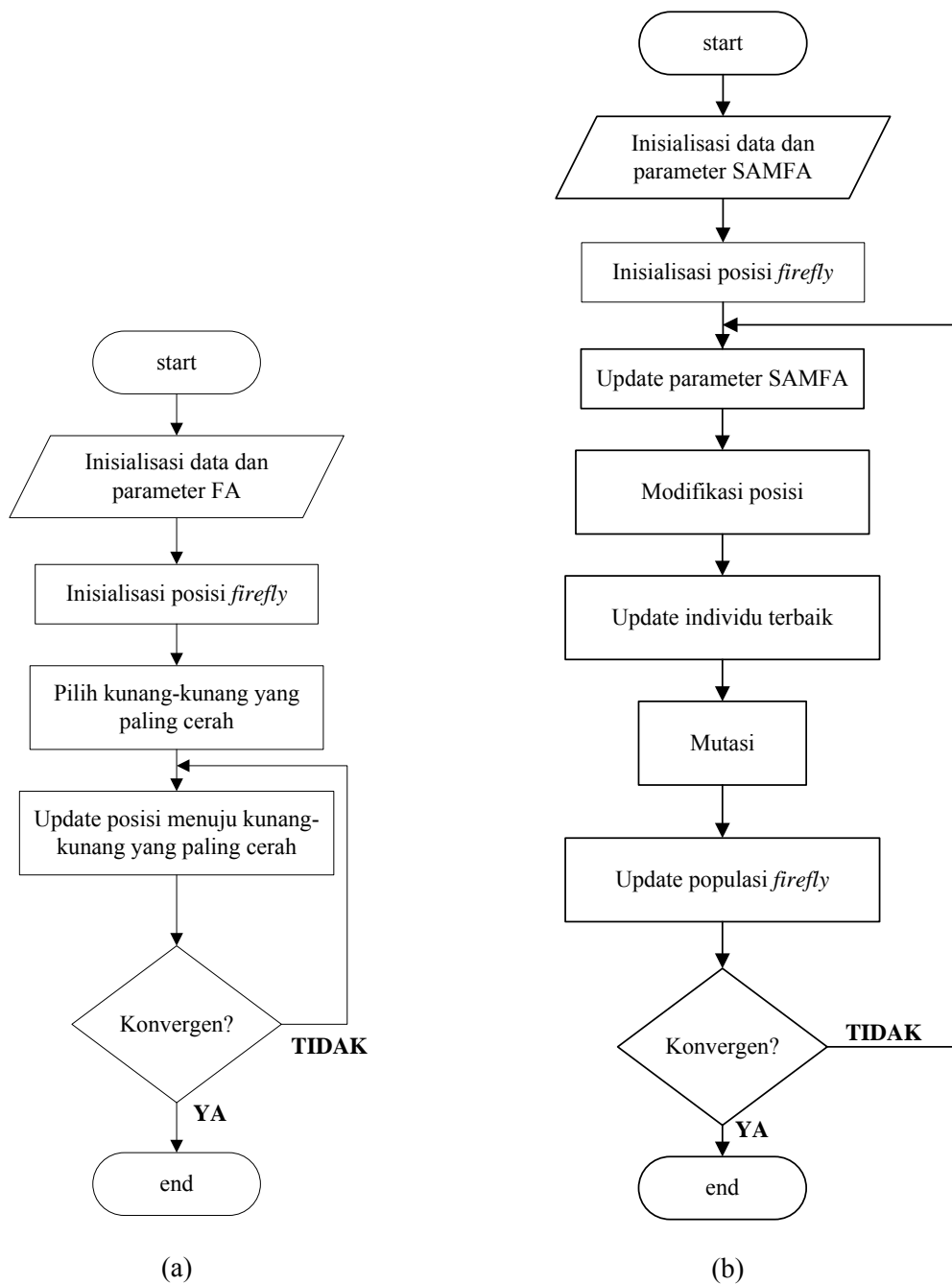
$$m = 1, \dots, N_{firefly}$$

Hal ini seharusnya ditunjukkan bahwa variabel yang baru tidak dimasukkan ke dalam penjumlahan tingkat kecerahan pada masing-masing kunang-kunang, tetapi dipasang secara *self-adaptive* untuk meningkatkan perubahan karakteristik dari kunang-kunang dalam masalah pencarian posisi dan mengurangi resiko terjebak dalam *local minima*. Selain itu, dalam persamaan (2.42) dirumuskan berdasarkan peningkatan dimensi masing-masing elemen seperti ditunjukkan dalam persamaan (2.40).

$$P_{m,firefly}^{k, self-adaptive} = \begin{cases} \begin{aligned} & if G(P_{n,firefly}^k) < G(P_{m,firefly}^k) \\ & P_{m,firefly}^{k, self-adaptive} \\ & + \beta^k (P_{n,firefly}^{k, self-adaptive} - P_{m,firefly}^{k, self-adaptive}) + \\ & \alpha^k |P_{max, self-adaptive} - P_{min, self-adaptive}| \\ & (rand_{1 \times NG+1}(\cdot) - \frac{1}{2}) \end{aligned} \\ else \\ P_{m,firefly}^{k, self-adaptive} \end{cases} \quad (2.40)$$

$$m = 1, \dots, N_{firefly} \quad n = 1, \dots, N_{firefly}$$

Dari penjelasan pada sub bab 2.5.2 dan 2.5.3 di atas, FA akan dimodifikasi sedemikian rupa hingga membentuk algoritma baru dengan nama SAMFA. Diagram alir dari *original* FA dan SAMFA ditunjukkan oleh diagram alir pada Gambar 2.5 (Taher, 2012).



Gambar 2.5. Diagram alir (a) FA, (b) SAMFA

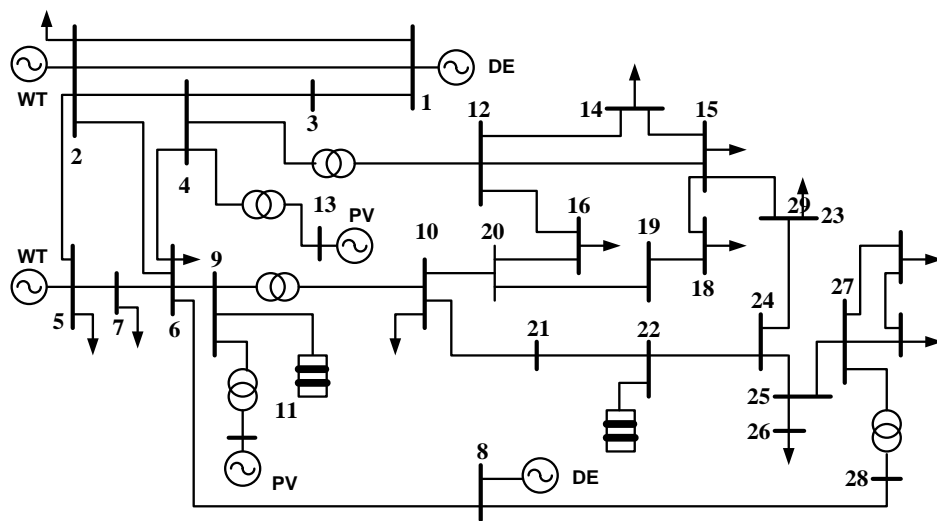
*Halaman ini sengaja dikosongkan*

### BAB 3

#### PEMODELAN SISTEM DAN IMPLEMENTASI ALGORITMA

##### 3.1. Penerapan Sistem Kelistrikan *Stand-alone Microgrid*

Penelitian ini menggunakan sistem pengujian IEEE 30 bus yang telah dimodifikasi sebagai representasi jaringan kelistrikan *stand-alone microgrid* seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 3.1.

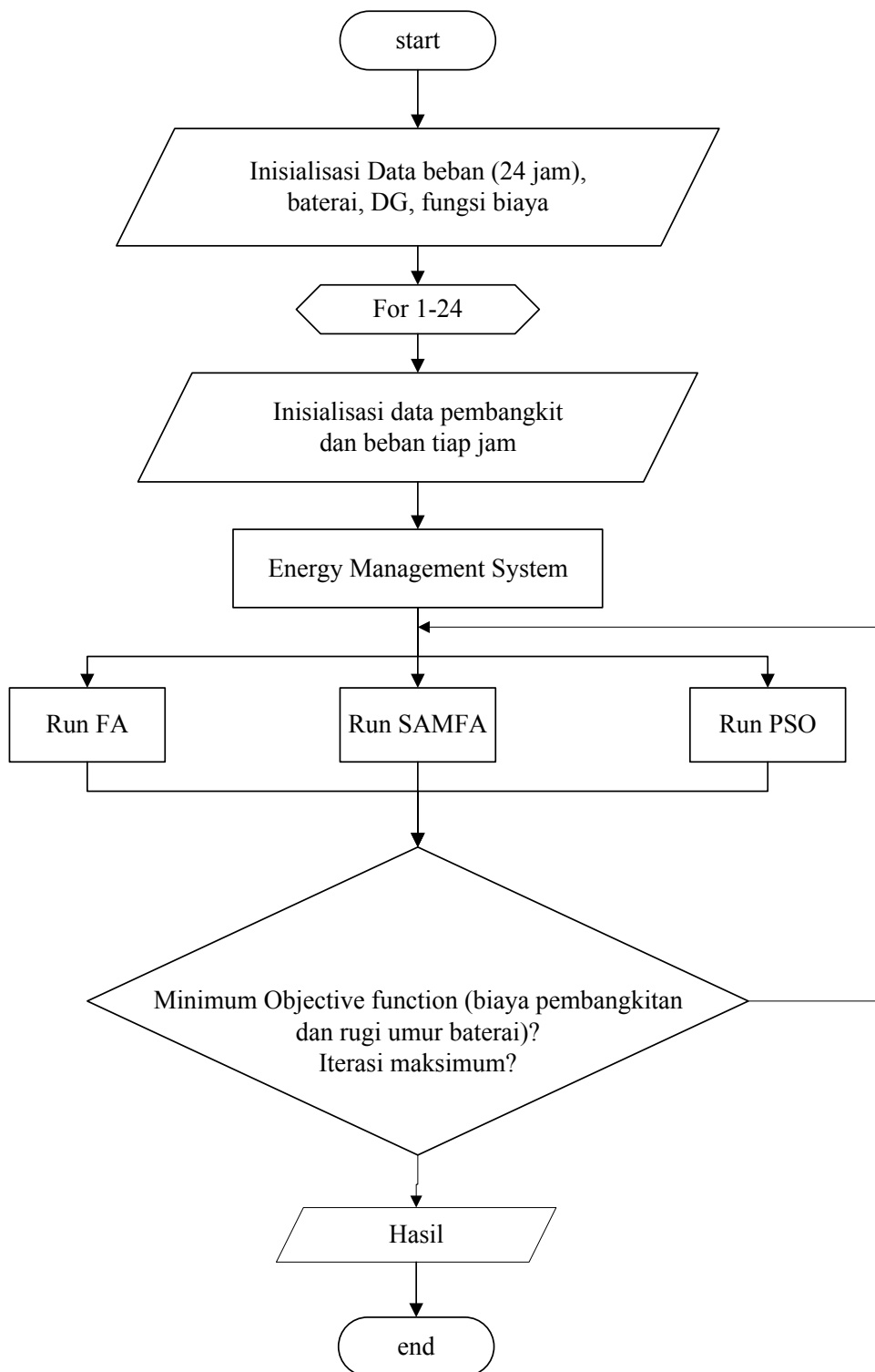


Gambar 3.1 Sistem pengujian IEEE 30 Bus yang telah dimodifikasi

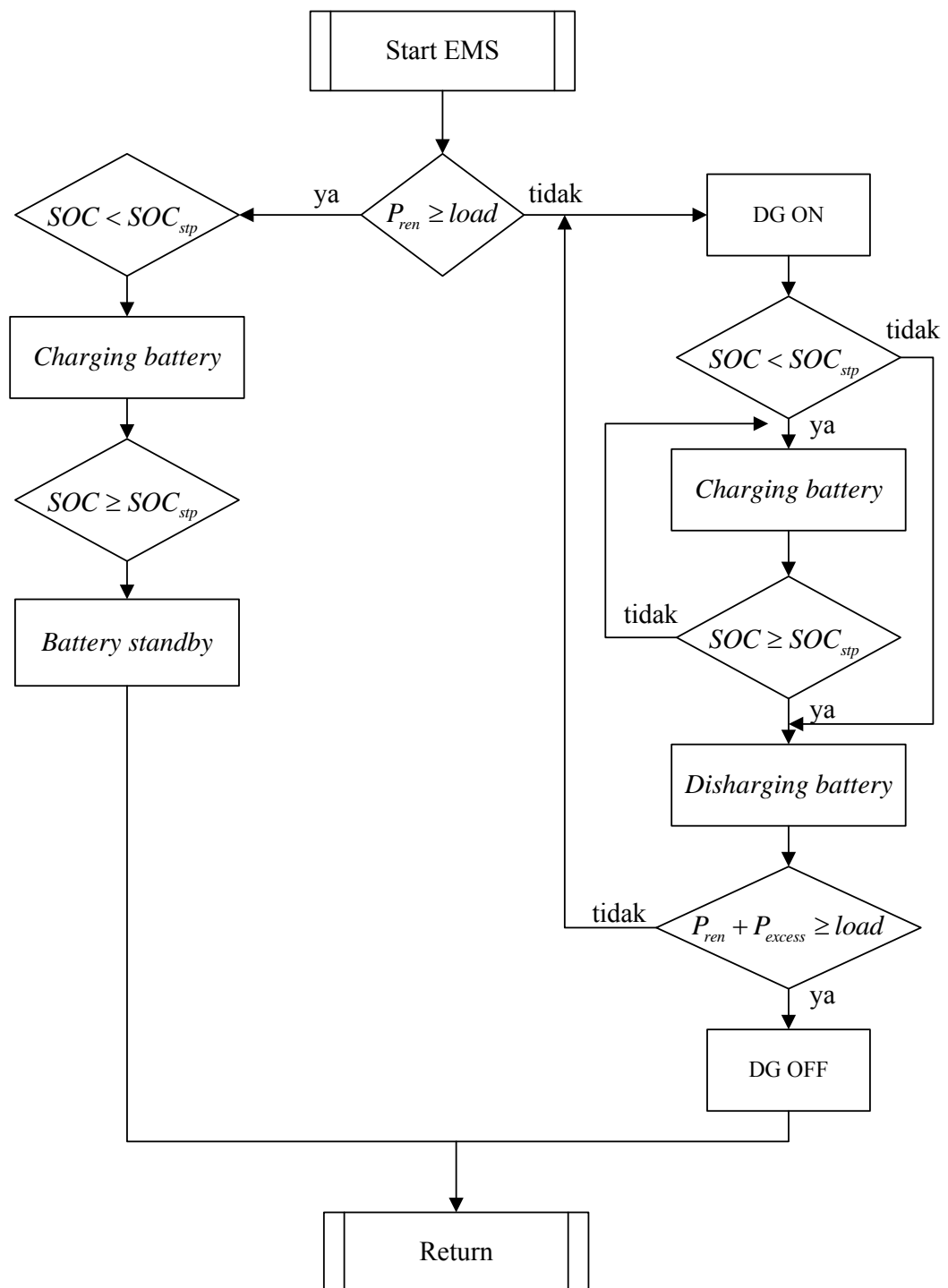
Sistem ini telah dimodifikasi dengan 8 pembangkit dengan komponen-komponen seperti yang ditunjukkan oleh Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Komponen Pembangkit dari Sistem *Stand-alone Microgrid*

Jenis Pembangkit	Turbin Angin	Photovoltaic	Diesel	Baterai
Kapasitas	840 Watt	83 Watt	175 kW	2V/1000 Ah
Jumlah	500	1000	2	1000



Gambar 3.2 Diagram alir implementasi algoritma



Gambar 3.3 Diagram Alir *Stand-alone microgrid* Tiap Jam

### 3.2. Metode Penyelesaian *Multiobjective* Menggunakan Metode *Weight Sum*

Metode *weight sum* merupakan metode yang menggabungkan dua atau lebih *objective function* menjadi satu kesatuan. Metode ini dilakukan dengan cara menambahkan koefisien pembobot pada masing-masing *objective function*. Nilai koefisien pembobot yang digunakan merupakan nilai yang ditentukan dari proporsi relatif dari masing-masing *objective function* (Primaditya, 2013; Yun, 2013). Persamaan yang digunakan dalam penelitian ini untuk menyelesaikan *multiobjective function* dirumuskan dalam persamaan (3.1).

$$\min \{F(P)\} = \min \left\{ \sum_{n=1}^k w_n s_n f(P)_n \right\} \quad (3.1)$$

Persamaan (3.1) dapat terpenuhi bila memenuhi syarat berikut.

$$\sum_{n=1}^k w_n = 1 \quad (3.2)$$

### 3.3. Strategi Operasi Optimum untuk Meminimalkan Biaya Pembangkitan dan Kerugian Umur Baterai

Implementasi SAMFA dan 2 metode pembanding lainnya, PSO dan FA, pada penyelesaian operasi optimum *stand-alone microgrid* ditunjukkan oleh Gambar 3.2. Pada penyelesaian operasi optimum ini, *stand-alone microgrid* disimulasikan seolah-olah dijalankan selama 24 jam. Dengan simulasi ini, dilakukan untuk mengetahui SOC baterai tiap jam. Selain itu, dengan kondisi pembangkit dan beban yang berbeda-beda tiap jam, maka biaya pembangkit pada masing-masing juga akan berbeda.

Generator *diesel* dan baterai berfungsi sebagai cadangan apabila daya pada pembangkit energi terbarukan tidak mencukupi untuk mensupply beban. Gambar 3.3 menunjukkan strategi penyelesaian *stand-alone microgrid* dengan menggunakan baterai. Dari Gambar 3.3 tersebut, dapat diketahui bahwa langkah awal yang pertama kali dilakukan adalah pembacaan inisialisasi parameter-parameter pada sistem seperti data beban, rating daya pembangkit, dan SOC dari baterai.

Pembacaan data irradiansi dan temperatur pada daerah disekitar panel PV juga dilakukan untuk mendapatkan daya keluaran dari PV, dengan menggunakan persamaan (2.1). Untuk daya keluaran dari turbin angin diperoleh dengan menggunakan persamaan (2.4) dengan mempertimbangkan data dari kecepatan angin. Selanjutnya kedua daya keluaran tersebut ditambahkan sehingga menjadi daya dari energi terbarukan. Jika daya tersebut kurang dari beban pada jam tersebut maka ditanyakan lagi apakah SOC baterai kurang dari minimum, jika iya maka *diesel* akan ON. *Diesel* akan mensuplai beban dan apabila masih ada sisa pembangkitan akan dibuat untuk *charging* baterai. Pengisian baterai dilakukan hingga mencapai  $SOC_{max}$ . Apabila pengisian baterai telah berhenti maka *diesel* akan OFF. Besar daya pengisian baterai sebesar 0,1 dari kapasitas baterai. Akan tetapi bila SOC baterai lebih dari  $SOC_{stp}$  maka baterai akan digunakan sebagai sumber untuk mensuplai daya ke beban dengan kapasitas maksimum sebesar  $P_{excess}$

Pengisian baterai dilakukan pula pada saat daya yang dihasilkan oleh *renewable energy* lebih besar dari beban dan SOC baterai kurang dari  $SOC_{stp}$ . Pengisian baterai akan dilakukan hingga baterai mendekati kondisi *full capacity* atau kondisi maksimum. Apabila daya yang dihasilkan oleh *renewable energy* melimpah dan SOC baterai lebih dari  $SOC_{stp}$ , maka baterai akan diposisikan dalam kondisi *standby* (Bo, 2013).

### 3.4. Penyelesaian *Multiobjective* Menggunakan Metode PSO

Algoritma PSO ini terinspirasi dari sekelompok burung yang sedang mencari makan. Sekelompok burung itu akan bergerak menuju tempat dengan jumlah makanan yang paling banyak. Pada penyelesaian *multiobjective* ini, daya pembangkitan masing-masing pembangkit digambarkan sebagai seekor burung atau partikel. Sedangkan nilai *fitness* dari *multiobjective* digambarkan sebagai posisi dengan jumlah makanan yang paling banyak.



1. Random daya pembangkitan dengan tetap memperhatikan *constraints* yang ada. Daya yang diperoleh dari proses random ini, kemudian dijadikan inisialisasi daya pembangkitan pada proses *power flow*. Setelah *running power flow*, daya pembangkitan pada *slack bus* perlu dikoreksi kembali, apakah masih tetap dalam *constraints* yang diijinkan ataukah tidak. Bila melanggar *constraints*, maka daya pembangkitan yang lain akan dikurangi atau ditambah sampai daya pada *slack bus* tidak lagi melanggar *constraints*.
2. Perhitungan kecepatan, biaya pembangkitan, kerugian umur baterai, *life loss cost*, dan nilai *fitness* dari *multiobjective*. Hasil yang diperoleh dari proses ini selanjutnya digunakan untuk menentukan partikel terbaik atau kombinasi daya pembangkitan terbaik dan *global best* berdasarkan nilai *fitness* yang paling rendah.
3. *Update* kecepatan dan posisi partikel menuju nilai partikel terbaik. Setiap *update* kecepatan dan partikel dilakukan *running powerflow* dan pengecekan *slack bus* agar tidak melanggar *constraint*.
4. *Update* nilai *fitness*, partikel terbaik, dan global terbaik.
5. Ulangi langkah no. 3 dan 4 hingga mencapai iteraksi maksimum.

### 3.5. Penyelesaian *Multiobjective* Menggunakan Metode FA

Metode metaheurostik menggunakan FA terinspirasi dari pergerakan kunang-kunang yang bergerak menuju kunang-kunang yang lebih cerah. Dalam penyelesaian *multiobjective* ini, kunang-kunang direpresentasikan sebagai daya pembangkitan. Sedangkan tingkat kecerahan kunang-kunang merupakan nilai *fitness multiobjective* yang diharapkan.

Proses awal penyelesaian *multiobjective* menggunakan metode FA ini dilakukan dengan inisialisasi parameter FA dan data-data yang digunakan, seperti beban, pembangkitan, fungsi biaya, SOC baterai, dan *counstraints*. Proses selanjutnya dijelaskan sebagai berikut:

1. Random daya pembangkitan dengan tetap memperhatikan *constraints* yang ada. Daya yang diperoleh dari proses random ini, kemudian dijadikan inisialisasi daya pembangkitan pada proses *power flow*. Setelah *running*

- power flow*, daya pembangkitan pada *slack bus* perlu dikoreksi kembali, apakah masih tetap dalam *constraints* yang diijinkan ataukah tidak. Bila melanggar *constraints*, maka daya pembangkitan yang lain akan dikurangi atau ditambah sampai daya pada *slack bus* tidak lagi melanggar *constraints*.
2. Perhitungan biaya pembangkitan, kerugian umur baterai, *life loss cost*, dan nilai *fitness* dari *multiobjective*. Hasil yang diperoleh dari proses ini selanjutnya digunakan untuk menentukan posisi terbaik atau kombinasi daya pembangkitan terbaik berdasarkan nilai *fitness* yang paling rendah.
  3. *Update* posisi kunang-kunang menuju kunang-kunang dengan tingkat kecerahan yang paling cerah. Dalam hal ini, kombinasi daya pembangkitan akan di-*update* menuju nilai kombinasi yang memiliki nilai *fitness* yang paling rendah. Setiap *update* posisi dilakukan *running powerflow* dan pengecekan *slack bus* agar tidak melanggar *constraint*.
  4. *Update* biaya pembangkitan, kerugian umur baterai, *life loss cost*, dan nilai *fitness multiobjective*.
  5. Langkah pada no. 2 sampai 4 ini akan dilakukan berulang-ulang hingga iterasi maksimum.

### 3.6. Penyelesaian *Multiobjective* Menggunakan Metode SAMFA

Metode SAMFA merupakan modifikasi dari FA seperti yang telah dijelaskan pada bab 2. Secara umum proses penyelesaian *multiobjective* menggunakan metode ini pun hampir sama dengan metode FA. Perbedaan metode ini dengan metode FA adalah adanya strategi mutasi yang bertujuan agar nilai konvergensi dari algoritma ini tidak terjebak dalam lokal optimum.

Proses awal penyelesaian *multiobjective* menggunakan metode SAMFA ini dilakukan dengan inisialisasi parameter SAMFA dan data-data yang digunakan, seperti beban, pembangkitan, fungsi biaya, SOC baterai, dan *constraints*. Proses selanjutnya dijelaskan sebagai berikut:

1. Random daya pembangkitan dengan tetap memperhatikan *constraints* yang ada. Daya yang diperoleh dari proses random ini, kemudian dijadikan inisialisasi daya pembangkitan pada proses *power flow*. Setelah *running power flow*, daya pembangkitan pada *slack bus* perlu dikoreksi kembali,

- apakah masih tetap dalam *constraints* yang diijinkan ataukah tidak. Bila melanggar *constraints*, maka daya pembangkitan yang lain akan dikurangi atau ditambah sampai daya pada *slack bus* tidak lagi melanggar *constraints*.
2. Perhitungan biaya pembangkitan, kerugian umur baterai, *life loss cost*, dan nilai *fitness* dari *multiobjective*. Hasil yang diperoleh dari proses ini selanjutnya digunakan untuk menentukan posisi terbaik atau kombinasi daya pembangkitan terbaik berdasarkan nilai *fitness* yang paling rendah.
  3. *Tuning* faktor perpindahan  $\alpha$  dan koefisien absorbs  $\gamma$ .
  4. *Update* posisi kunang-kunang menuju kunang-kunang dengan tingkat kecerahan yang paling cerah. Dalam hal ini, kombinasi daya pembangkitan akan di-*update* menuju nilai kombinasi yang memiliki nilai *fitness* yang paling rendah. Setiap *update* posisi dilakukan *running powerflow* dan pengecekan *slack bus* agar tidak melanggar *constraint*. Proses ini akan dilakukan berulang-ulang hingga iterasi maksimum.
  5. *Update* biaya pembangkitan, kerugian umur baterai, *life loss cost*, dan nilai *fitness multobjective*.
  6. Strategi mutasi dilakukan dengan langkah-langkah yang dijelaskan pada bab 2. Populasi baru yang diperoleh merupakan kombinasi daya pembangkitan baru. Daya pembangkitan harus tetap dijaga agar tetap dalam *constraint* yang diijinkan. Selanjutnya adalah *run power flow*. Pada proses ini, daya pembangkitan *slack bus* harus tetap dijaga agar tetap dalam *constraint* yang diijinkan.
  7. Langkah no. 2 sampai dengan 6 ini akan dilakukan berulang-ulang hingga iterasi maksimum.

## BAB 4

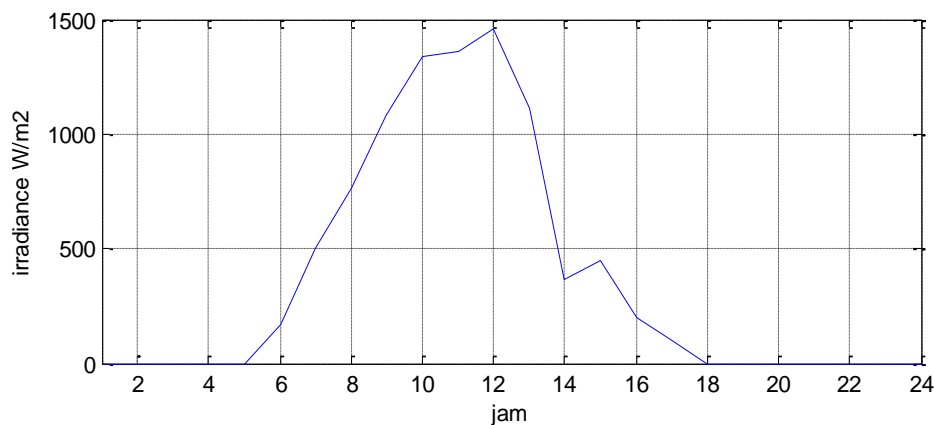
### HASIL SIMULASI DAN ANALISIS DATA

#### 4.1. Karakteristik Pembangkit

Dalam jaring *microgrid* pembangkit energi terbarukan merupakan komponen utama yang perlu dimaksimalkan kinerjanya. Penelitian ini menggunakan 4 jenis pembangkit dengan jumlah seperti yang ditunjukkan oleh Tabel 3.1. Masing-masing pembangkit memiliki karakteristik masing-masing yang mempengaruhi daya keluaran dari masing-masing pembangkit.

##### 4.1.1. Photovoltaic

Daya yang dikeluarkan oleh masing-masing unit *photovoltaic* sangat dipengaruhi oleh profil data karakteristik radiasi matahari dan suhu lingkungan. Data karakteristik radiasi matahari dan suhu lingkungan selama 24 jam yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan oleh Gambar 4.1 dan Gambar 4.2.

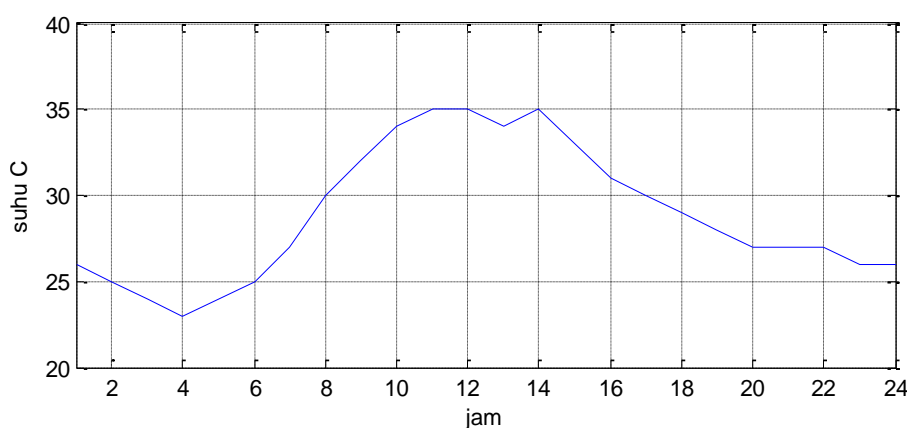


Gambar 4.1 Karakteristik radiasi sinar matahari

Pada gambar 4.1 didapatkan karakteristik radiasi sinar matahari yang sangat berpengaruh pada keluaran daya pada *photovoltaic*. Pada pukul 06.00 WIB radiasi matahari mulai naik dalam arti lain sinar matahari mulai menyinari papan *photovoltaic*. Selanjutnya radiasi naik terus sampai pada pukul 11.00 WIB sampai pukul 13.00 WIB merupakan puncak radiasi sinar matahari yang diterima oleh

*photovoltaic*. Pada jam tersebut juga *photovoltaic* mampu membangkitkan daya terbesar.

Setelah pada puncak radiasi, profilnya terus menurun hingga pada pukul 17.00 WIB sampai berulang pada hari berikutnya yaitu pada pukul 06.00 WIB radiasi sinar matahari sebesar nol (tidak ada sinar matahari).



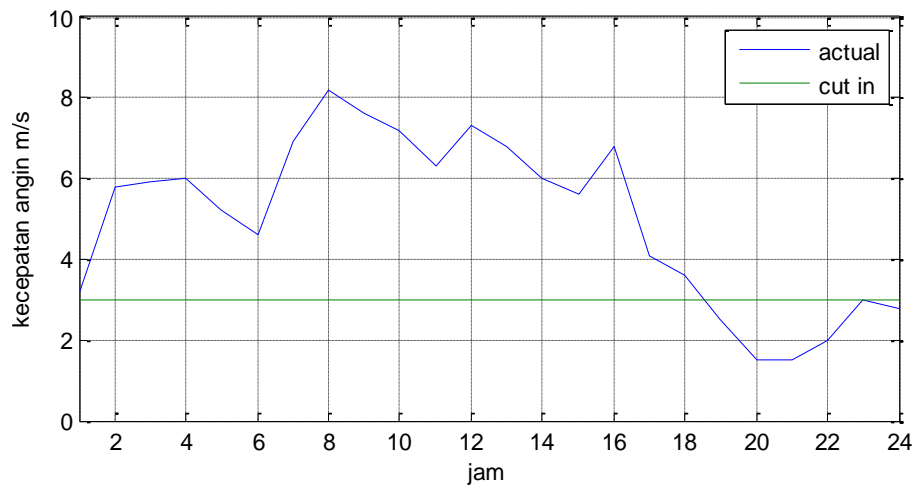
Gambar 4.2 Karakteristik temperatur

Selain radiasi sinar matahari, karakteristik suhu dari *photovoltaic* juga mempengaruhi daya keluaran dari *photovoltaic*. Gambar 4.2 merupakan profil suhu dari papan *photovoltaic*. Profil suhu dari *photovoltaic* tidak begitu memiliki perubahan yang drastis, hanya saja pada saat malam hari suhu *photovoltaic* cukup rendah kurang dari 30°C, sedangkan pada siang hari suhu lebih dari 30°C hingga mencapai 35°C.

Setelah didapatkan karakteristik dari irradiansi sinar matahari pada gambar 3.2 dan karakteristik temperatur pada gambar 3.3 dihari yang sama dan lokasi yang sama maka dengan menggunakan persamaan (2.1) bisa diketahui daya yang dibangkitkan oleh *photovoltaic*. Berikut merupakan grafik daya yang dibangkitkan oleh *photovoltaic* selama 24 jam.

#### 4.1.2. Wind Turbine

Pada tugas akhir ini menggunakan WT AIR403, dengan rating daya 130 Watt per WT. Dengan jumlah WT sebanyak 100 buah yang terbagi menjadi dua, yakni 50 buah diinjeksikan pada bus 2 dan 50 buah sisanya diinjeksikan pada bus 5.



Gambar 4.3 Karakteristik kecepatan angin

Data karakteristik kecepatan angin didapat dari paper (Bo, 2013). Dari data diatas didapatkan bahwa perubahan daya keluaran dari WT sangat bervariasi, dikarenakan karakteristik kecepatan angin yang berbeda-beda.

Kecepatan angin *cut in* dari WT yang digunakan sebesar 3,5 m/s. Hal tersebut berarti kecepatan minimal angin yang berhembus melewati WT tersebut adalah 3,5 m/s. Sedangkan saat kurang dari itu maka WT tidak mampu mengeluarkan daya.

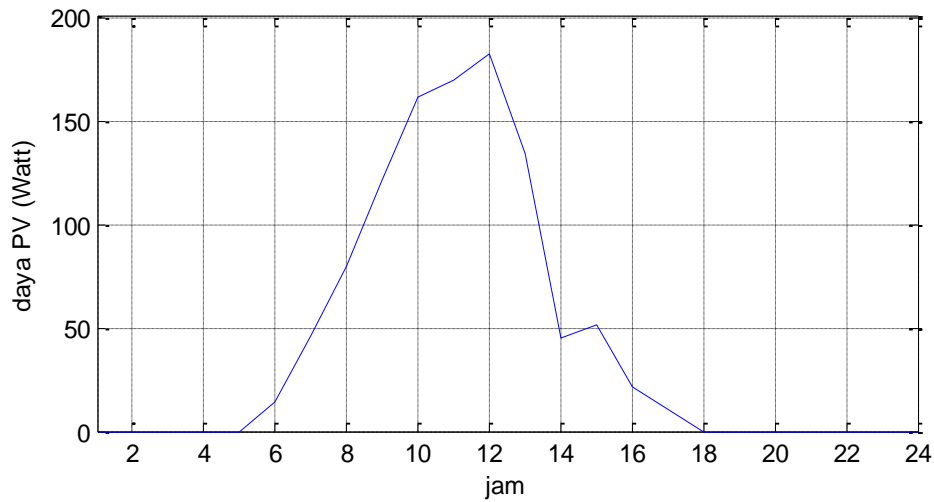
#### 4.1.3. Daya Keluaran Pembangkit Energi Terbarukan

Dalam jaring *microgrid* pembangkit energi terbarukan merupakan komponen utama yang perlu dimaksimalkan kinerjanya. Setelah didapatkan karakteristik dari irradiasi sinar matahari pada Gambar 4.1 dan karakteristik temperatur pada Gambar 4.2 dihari yang sama dan lokasi yang sama maka dengan menggunakan persamaan (3.1) sehingga dapat diketahui daya yang dibangkitkan oleh PV. Pada Gambar 4.4, ditunjukkan daya yang dibangkitkan oleh seluruh PV selama 24 jam.

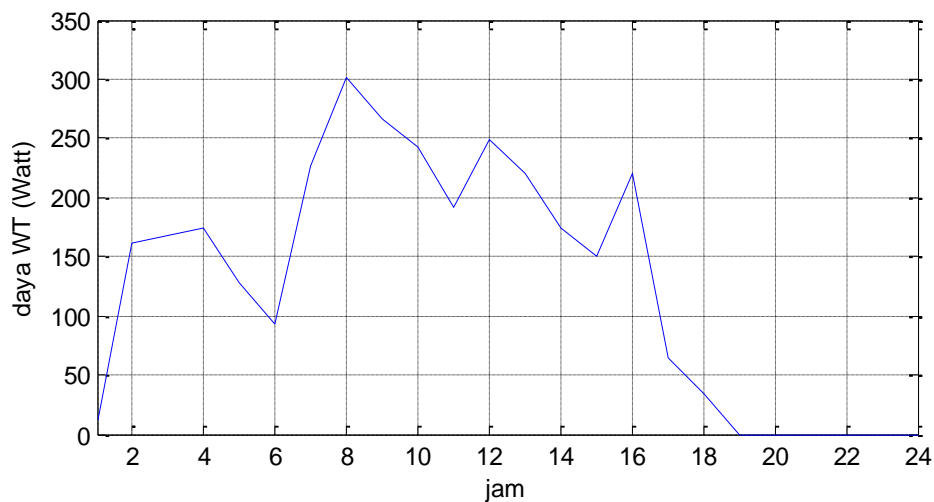
Sedangkan daya keluaran dari WT dihitung menggunakan persamaan (3.5) dengan menggunakan karakteristik angin pada Gambar 4.3 sehingga diperoleh daya keluaran WT seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4.5. Gambar 4.5 tersebut merupakan daya keluaran dari seluruh WT.

Dari grafik daya keluaran PV dan WTa pada Gambar 4.4 dan Gambar 4.5, didapatkan daya keluaran total dari energi terbarukan dengan menjumlahkan

seluruh daya keluaran PV dan WT. Daya keluaran dari *renewable energy* tersebut ditunjukkan oleh Gambar 4.6.



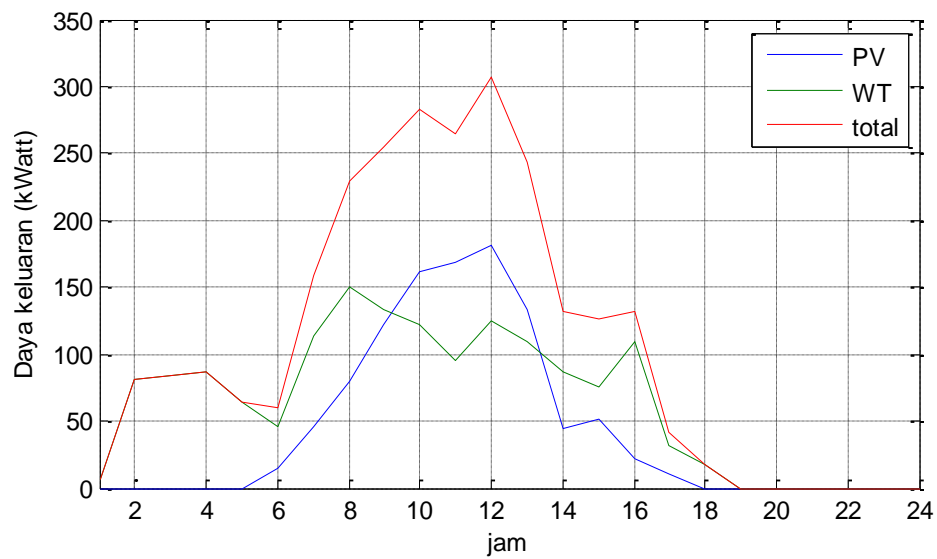
Gambar 4.4 Daya keluaran PV



Gambar 4.5 Daya keluaran WT Selama 24 jam

## 4.2. Karakteristik Beban

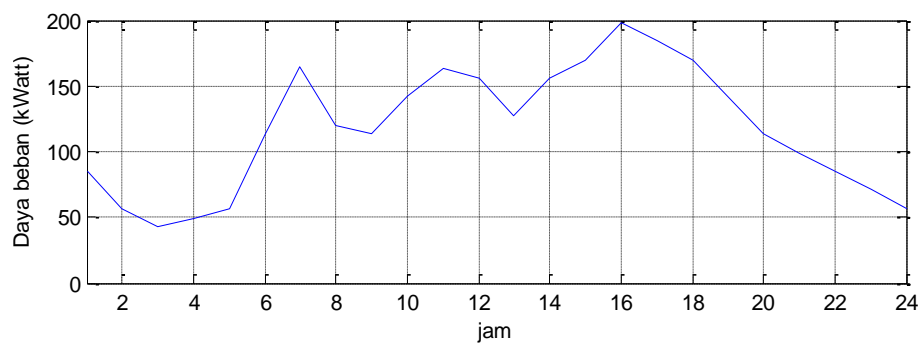
Penelitian ini menggunakan data beban IEEE 30 bus. Data beban pada masing-masing bus dimodifikasi dengan skala kapasitas beban, sehingga seolah-olah sistem ini berjalan selama 24 jam. Data beban selama 24 jam pada sistem ini ditunjukkan oleh Tabel 4.1. Dari Tabel 4.1, didapatkan grafik karakteristik beban seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4.7.



Gambar 4.6 Daya total keluaran dari *renewable energy*

Tabel 4.1 Beban IEEE 30 Bus Modifikasi Selama 24 Jam

Pukul	Beban( kW)	Pukul	Beban( kW)	Pukul	Beban( kW)
01:00	85,020	09:00	113,360	17:00	184,210
02:00	56,680	10:00	141,700	18:00	170,040
03:00	42,510	11:00	162,955	19:00	141,700
04:00	49,595	12:00	155,870	20:00	113,360
05:00	56,680	13:00	127,530	21:00	99,190
06:00	113,360	14:00	155,870	22:00	85,020
07:00	164,372	15:00	170,040	23:00	70,850
08:00	120,445	16:00	198,380	00:00	56,680



Gambar 4.7 Karakteristik beban *microgrid* selama 24 jam



Dari Tabel 4.1 dan Gambar 4.7, dapat diketahui bahwa beban puncak terjadi pada pukul 16.00. Data tersebut menunjukkan bahwa *renewable energy* harus mampu mensuplai daya untuk memenuhi kebutuhan beban. Apabila *renewable energy* tidak mampu memenuhi kebutuhan beban, maka harus ada sumber daya lain yang digunakan untuk suplai daya ke beban.

#### 4.3. Parameter Pembangkit

PV, WT, dan baterai berbeda dengan diesel engine. Ketiga jenis pembangkit ini tidak membutuhkan bahan bakar untuk dapat membangkitkan daya. Fungsi biaya dari ketiga pembangkit ini diperoleh dari biaya investasi dan biaya operasional dan perawatan. Parameter-parameter PV, WT, dan baterai untuk membentuk fungsi biaya ditunjukkan oleh Tabel 4.2 (Bashir, 2012).

Tabel 4.2 Parameter Pembangkit

Parameter	Jenis Pembangkit		
	PV	WT	Baterai
Koefisien annuitization	0,900002394	0,900002394	0,900002394
Umur dari investasi	20	20	20
Biaya investasi (\$)	13.000,00	29.400,00	2.350,00
Biaya investasi (Rp)	170.167.866,70	406.267.776,00	34.821.973,33
Biaya perawatan (\$)/tahun	20	75	20
Biaya perawatan (Rp)/tahun	262.031,81	982.619,3	262.031,81
Biaya investasi/jam (Rp)	874,15	2087,00	178,88
Biaya perawatan/jam (Rp)	0,0023	0,0086	0,0023
Fungsi biaya	$874,15P_{pv}$	$2087P_{wt}$	$178,88P_{bat}$

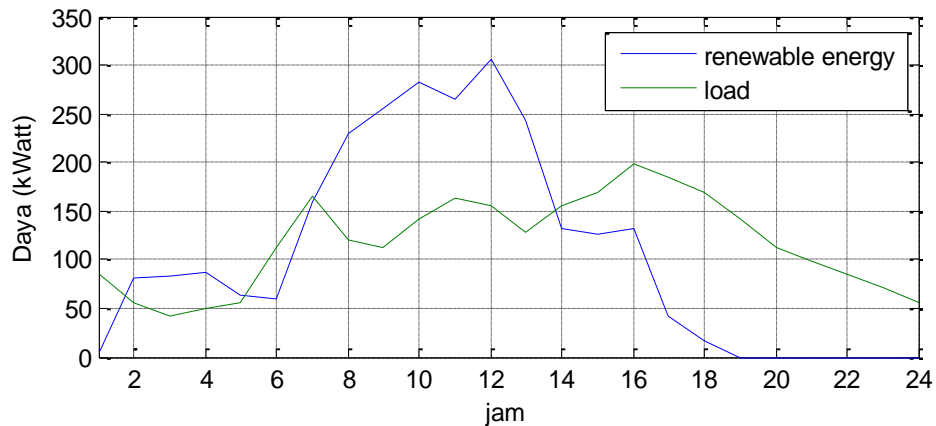
Berdasarkan persamaan (3.16) pada Bab 3, nilai a, b, dan c pada fungsi biaya diesel engine diketahui dari datasheet diesel engine itu sendiri. Sehingga didapatkan fungsi biaya diesel engine sebagai berikut:

$$F(P_{die}) = 3899,7 + 2099,7 P_{die} + 66,6 P_{die}^2 \quad (4.1)$$

#### 4.4. Simulasi Pengaturan Daya pada *Stand-Alone Microgrid*

Pada operasi *stand-alone microgrid* ini, perbandingan daya yang dihasilkan oleh *renewable energy* dan kebutuhan beban ditunjukkan oleh Gambar 4.8. Dari

gambar tersebut, dapat diketahui bahwa *renewable energy* memiliki kelebihan daya pada pukul 07.00 sampai dengan pukul 13.00. Sedangkan ketika kondisi beban puncak, yaitu pada pukul 14.00 sampai dengan 18.00 *renewable energy* tidak dapat mensuplai seluruh kebutuhan daya pada beban.



Gambar 4.8 Perbandingan daya beban dan *renewable energy*

Penyelesaian operasi optimum pada *stand-alone microgrid* ini ditunjukkan dalam dua studi kasus. Studi kasus pertama merupakan penyelesaian operasi optimum ketika SOC inisialisasi dalam kondisi *full charging* (SOC=1). Sedangkan studi kasus yang kedua adalah penyelesaian operasi optimum ketika SOC tidak dalam kondisi *full charging* (SOC<1). Dua studi kasus tersebut akan menunjukkan peran baterai sebagai media penyimpanan energi dan suplai daya ketika *renewable energy* tidak dapat mensuplai daya secara keseluruhan. Dari dua studi kasus ini pun, akan ditunjukkan bagaimana diesel sebagai *back up power supply* bekerja.

#### 4.4.1 Studi Kasus I

Studi kasus I ini merupakan kondisi saat inisialisasi SOC baterai pada pukul 01.00 dalam kondisi *full charging* (SOC=1). Gambar 4.8 menunjukkan perbandingan daya beban dan daya pada *renewable energy*. Karakteristik ini akan digunakan sebagai acuan *ON-OFF* baterai dan *diesel generator*. Status *ON-OFF* pembangkit ditunjukkan oleh Tabel 4.3.

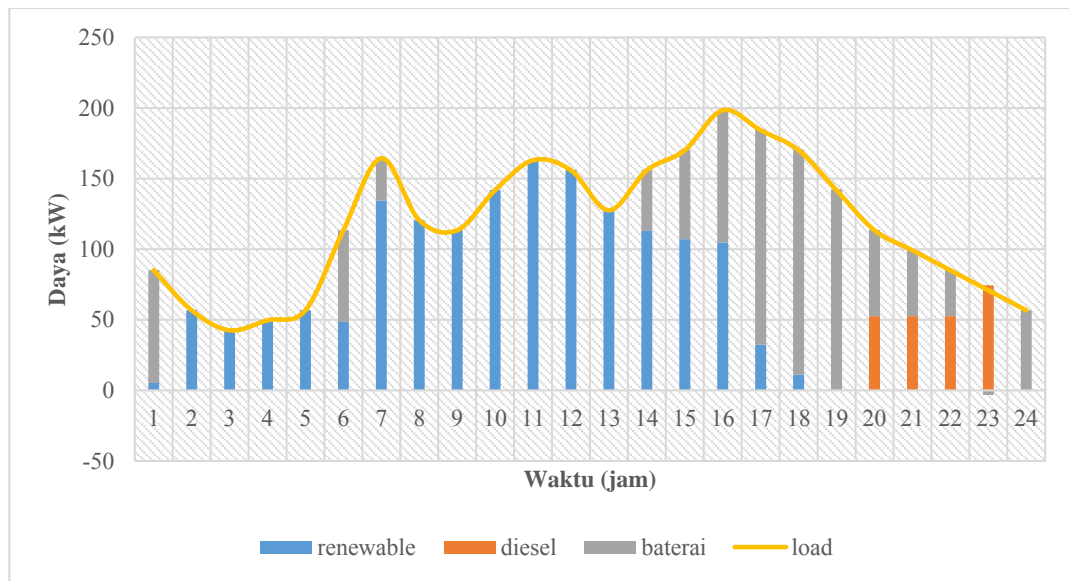
Tabel 4.3 Status *ON-OFF* Pembangkit pada Studi Kasus I

Pukul	DG 1	WT 1	WT 2	DG 1	BAT 1	PV 1	PV 2	BAT 2
1:00	0	1	1	0	1	0	0	0
2:00	0	1	1	0	0	0	0	0
3:00	0	1	1	0	0	0	0	0
4:00	0	1	1	0	0	0	0	0
5:00	0	1	1	0	0	0	0	0
6:00	0	1	1	0	1	1	1	0
7:00	0	1	1	0	1	1	1	0
8:00	0	1	1	0	0	1	1	0
9:00	0	1	1	0	0	1	1	0
10:00	0	1	1	0	0	1	1	0
11:00	0	1	1	0	0	1	1	0
12:00	0	1	1	0	0	1	1	0
13:00	0	1	1	0	0	1	1	0
14:00	0	1	1	0	1	1	1	0
15:00	0	1	1	0	1	1	1	0
16:00	0	1	1	0	1	1	1	0
17:00	0	1	1	0	1	1	1	1
18:00	0	1	1	0	1	0	0	1
19:00	0	0	0	0	1	0	0	1
20:00	1	0	0	0	0	0	0	1
21:00	1	0	0	0	0	0	0	1
22:00	1	0	0	0	0	0	0	1
23:00	1	0	0	0	0	0	0	1
0:00	0	0	0	0	1	0	0	0

**Keterangan:**

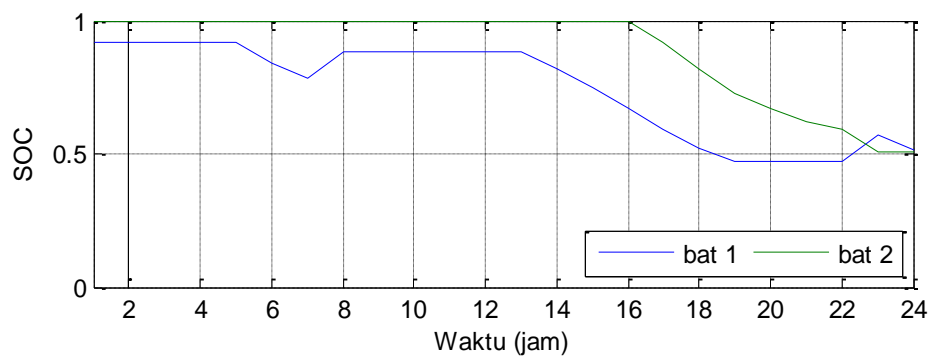
- 0 : pembangkit OFF
- 1 : pembangkit ON

Status ON-OFF pembangkit yang ditunjukkan oleh Tabel 4.3 ini sangat dipengaruhi oleh jumlah daya yang dihasilkan oleh *renewable energy* dan kebutuhan beban. Baterai dan/atau DG digunakan untuk memenuhi kebutuhan beban ketika *renewable energy* tidak dapat memenuhi kebutuhan beban. Gambar 4.9 menunjukkan profil operasi sistem *stand-alone microgrid* pada studi kasus ini. Pada gambar tersebut, baterai akan bernilai negatif ketika dalam kondisi *charging*. Kondisi ini baterai akan berubah menjadi beban.



Gambar 4.9 Profil operasi sistem *stand-Alone Microgrid* pada studi kasus I

Gambar 4.10 menunjukkan perubahan *state of charge* (SOC) baterai. SOC akan mengalami penurunan ketika digunakan sebagai suplai daya atau dalam kondisi *discharging* dan kenaikan ketika dalam kondisi *charging* atau sebagai beban. Sedangkan saat dalam kondisi *standby* SOC tidak mengalami perubahan sehingga memiliki nilai yang sama dengan SOC pada jam sebelumnya.



Gambar 4.10 Perubahan SOC pada studi kasus I

Kebutuhan beban mengalami kenaikan dengan kebutuhan daya yang paling besar dimulai pada pukul 13.00 hingga pukul 18.00. Sedangkan pada saat itu *renewable energy* tidak dalam kondisi yang baik atau *low performance* sehingga suplai daya sebagian besar disuplai oleh baterai. Penggunaan baterai ini

ditunjukkan dengan penurunan SOC seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4.10. Besar daya yang digunakan ditunjukkan oleh Gambar 4.9. Dari kedua gambar tersebut, dapat diketahui bahwa pada pukul 20.00 baterai sudah tidak mampu mensuplai kebutuhan seluruh beban sehingga DG diaktifkan. Agar baterai tetap dapat digunakan pada 24 jam berikutnya, *charging* baterai tidak hanya disuplai oleh *renewable energy* tapi juga DG. Pada kasus ini, hal itu terjadi pada pukul 23.00.

#### 4.4.2 Studi Kasus II

Studi kasus II ini merupakan kondisi saat inisialisasi SOC baterai pada pukul 01.00 tidak dalam kondisi *full charging* ( $SOC < 1$ ). Gambar 4.8 menunjukkan perbandingan daya beban dan daya pada *renewable energy*. Karakteristik ini akan digunakan sebagai acuan *ON-OFF* baterai dan DG. Status *ON-OFF* pembangkit ditunjukkan oleh Tabel 4.4.

Status *ON-OFF* pembangkit yang ditunjukkan oleh Tabel 4.4 ini sangat dipengaruhi oleh jumlah daya yang dihasilkan oleh *renewable energy* dan kebutuhan beban. Baterai dan/atau DG digunakan untuk memenuhi kebutuhan beban ketika *renewable energy* tidak dapat memenuhi kebutuhan beban. Gambar 4.11 menunjukkan profil operasi sistem *stand-alone microgrid* pada studi kasus ini. Pada gambar tersebut, baterai akan bernilai negatif ketika dalam kondisi *charging*. Kondisi ini baterai akan berubah menjadi beban.

Tabel 4.4 Status *ON-OFF* Pembangkit pada Studi Kasus II

Pukul	DG 1	WT 1	WT 2	DG 1	BAT 1	PV 1	PV 2	BAT 2
1:00	0	1	1	0	1	0	0	0
2:00	0	1	1	0	0	0	0	0
3:00	0	1	1	0	0	0	0	0
4:00	0	1	1	0	0	0	0	0
5:00	0	1	1	0	0	0	0	0
6:00	1	1	1	0	0	1	1	0
7:00	1	1	1	0	0	1	1	0
8:00	0	1	1	0	0	1	1	0
9:00	0	1	1	0	0	1	1	0
10:00	0	1	1	0	0	1	1	0
11:00	0	1	1	0	0	1	1	0

Lanjutan Tabel 4.4

Pukul	DG 1	WT 1	WT 2	DG 1	BAT 1	PV 1	PV 2	BAT 2
12:00	0	1	1	0	0	1	1	0
13:00	0	1	1	0	0	1	1	0
14:00	0	1	1	0	1	1	1	0
15:00	0	1	1	0	1	1	1	0
16:00	0	1	1	0	1	1	1	0
17:00	1	1	1	0	0	1	1	1
18:00	1	1	1	0	0	0	0	1
19:00	1	0	0	0	0	0	0	1
20:00	1	0	0	0	0	0	0	0
21:00	1	0	0	0	0	0	0	0
22:00	1	0	0	0	0	0	0	0
23:00	1	0	0	0	0	0	0	0
0:00	0	0	0	0	1	0	0	0

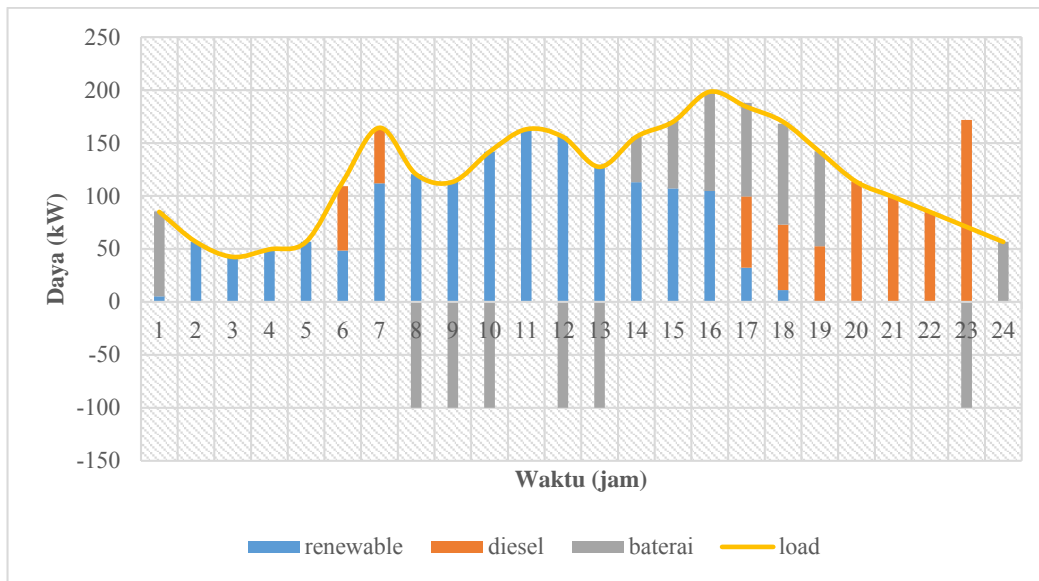
**Keterangan:**

- 0 : pembangkit OFF
- 1 : pembangkit ON

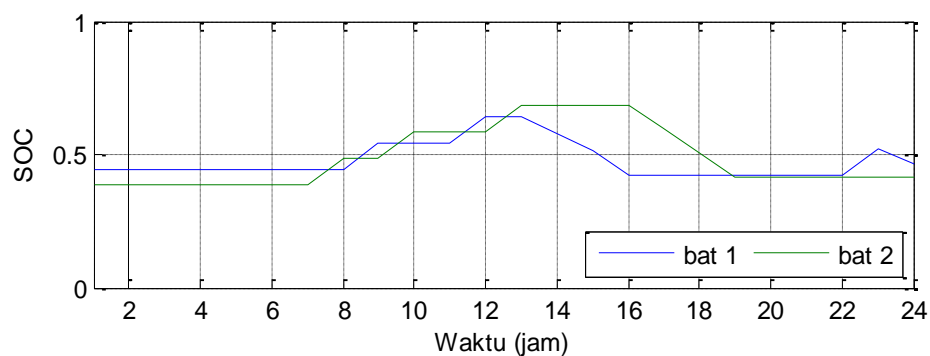
Gambar 4.12 menunjukkan perubahan state of charge (SOC) baterai. SOC akan mengalami penurunan ketika digunakan sebagai suplai daya atau dalam kondisi discharging dan kenaikan ketika dalam kondisi charging atau sebagai beban. Sedangkan saat dalam kondisi standby SOC tidak mengalami perubahan sehingga memiliki nilai yang sama dengan SOC pada jam sebelumnya. Besar SOC inisialisasi pada studi kasus II ini adalah 0.5212 dan 0.3866 untuk SOC baterai 1 dan SOC baterai 2.

Kebutuhan beban mengalami kenaikan dengan kebutuhan daya yang paling besar dimulai pada pukul 13.00 hingga pukul 18.00. Sedangkan pada saat itu *renewable energy* tidak dalam kondisi yang baik atau *low performance* sehingga suplai daya sebagian besar disuplai oleh baterai. Permasalahan kedua pada studi kasus ini adalah kondisi SOC yang kurang dari  $SOC_{stp}$  sehingga perlu diisi sebelum digunakan untuk memenuhi kebutuhan beban puncak tersebut. Gambar 4.11 menunjukkan pemanfaatan daya *renewable energy* yang melimpah pada pukul 07.00 hingga 13.00 untuk pengisian baterai sehingga pada Gambar 4.12 SOC pada

waktu itu mengalami kenaikan hingga melebihi  $SOC_{stp}$ . Pengisian baterai tidak hanya disuplai oleh *renewable energy* saja, tapi bila diperlukan DG juga digunakan untuk suplai daya pada saat *charging* baterai seperti yang terjadi pada pukul 23.00. Sama halnya dengan studi kasus I, baterai digunakan sebagai suplai daya pada pukul 13.00 hingga pukul 18.00 karena *renewable energy* tidak mampu memenuhi kebutuhan beban.



Gambar 4.11 Profil operasi sistem *stand-alone microgrid* pada studi kasus II



Gambar 4.12 Perubahan SOC pada studi kasus II

#### 4.5. Simulasi Operasi Optimum pada *Stand-Alone Microgrid*

Operasi optimum pada sistem ini digunakan untuk meminimalkan biaya pembangkitan dan *life loss cost* baterai. Sistem ini telah disimulasikan seolah-olah telah beroperasi selama 24 jam. Metode *self adaptive modified firefly algorithm* (SAMFA) digunakan dalam penyelesaian operasi optimum pada sistem ini. sebagai pembandingan, metode FA dan PSO juga digunakan dalam penyelesaian operasi optimum pada sistem ini.

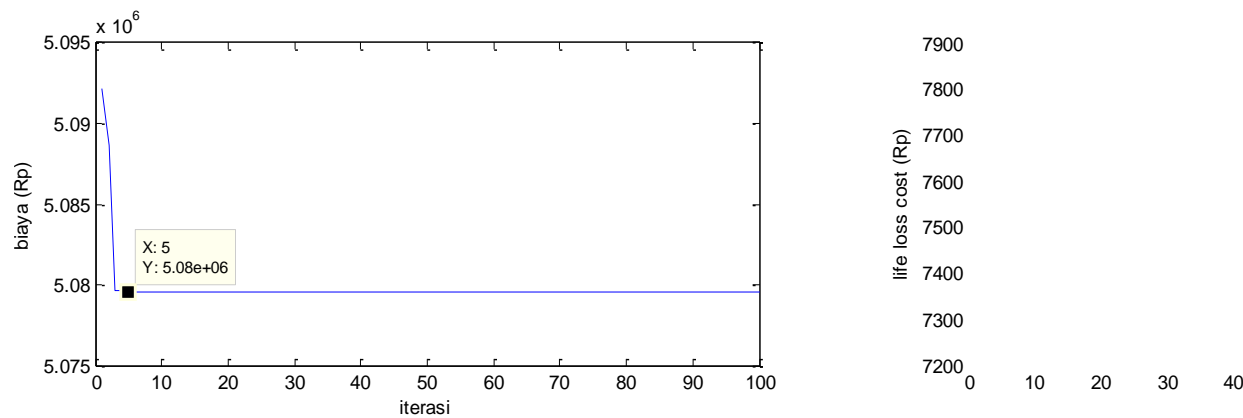
Seperti yang sudah dijelaskan pada sub bab sebelum ini, studi kasus I merupakan kondisi saat baterai dalam kondisi *full charging* (SOC=1). Sedangkan studi kasus II merupakan kondisi saat baterai tidak dalam kondisi *full charging* (SOC<1). Simulasi penyelesaian kedua fungsi objektif pada kedua studi kasus telah dilakukan, baik dengan salah satu fungsi objektif maupun dengan kedua fungsi objektif sekaligus. Perbandingan hasil simulasi saat hanya menggunakan salah satu fungsi objektif pada studi kasus I ditunjukkan oleh Tabel 4.5. Sedangkan grafik konvergensi dari masing-masing fungsi objektif ditunjukkan oleh Gambar 4.13 dan 4.14.

Tabel 4.5 Hasil Simulasi dengan Satu Fungsi Objektif pada Studi Kasus I

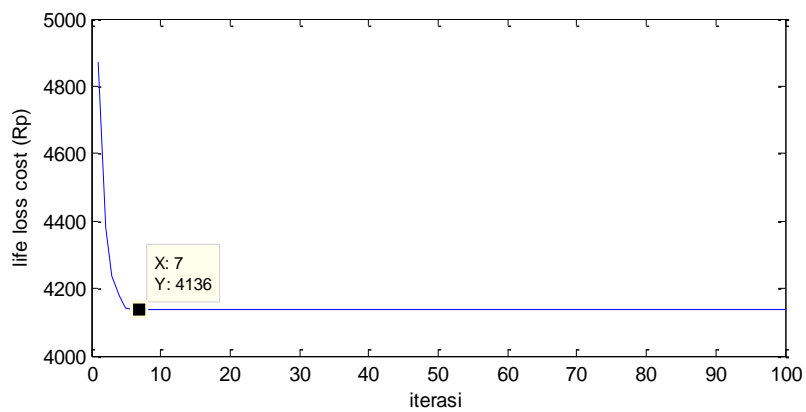
Fungsi Objektif	Biaya Pembangkitan		Life Loss Cost	
Pembangkitan	3039,81 kW	1594,43 kVAR	2939,78 kW	1553,97 kVAR
Beban	3035,42 kW	1262,63 kVAR	2935,42 kW	1262,63 kVAR
Kerugian	4,47 kW	332,54 kVAR	4,49 kW	292,29 kVAR
Kerugian Umur Baterai	0,59%		0,31%	
Biaya Pembangkitan	Rp	5.079.585,99	Rp	7.648.460,43
Life Loss Cost	Rp	7.860,02	Rp	4.136,30

Perbandingan hasil simulasi saat hanya menggunakan salah satu fungsi objektif pada studi kasus II ditunjukkan oleh Tabel 4.6. Sedangkan grafik konvergensi dari masing-masing fungsi objektif ditunjukkan oleh Gambar 4.15 dan 4.16.





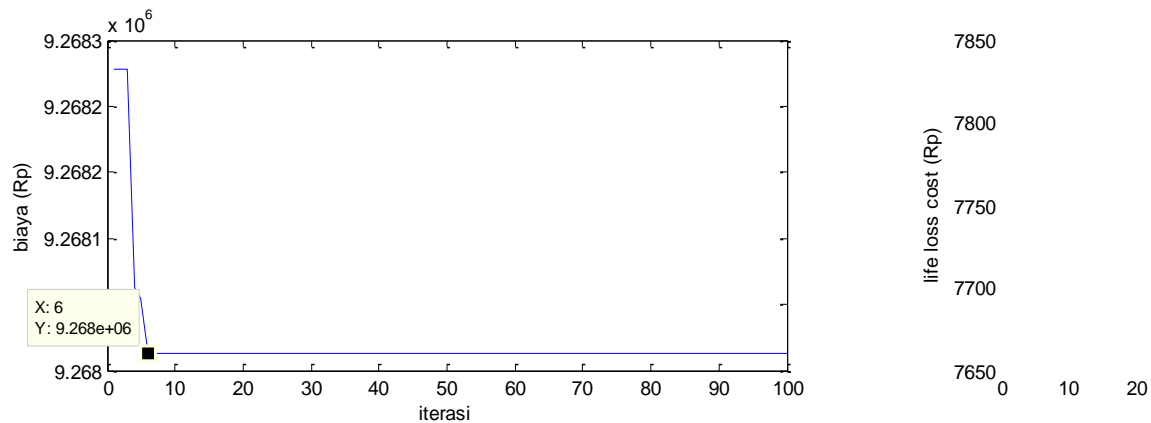
Gambar 4.13 Grafik konvergensi biaya pembangkitan pada studi kasus I



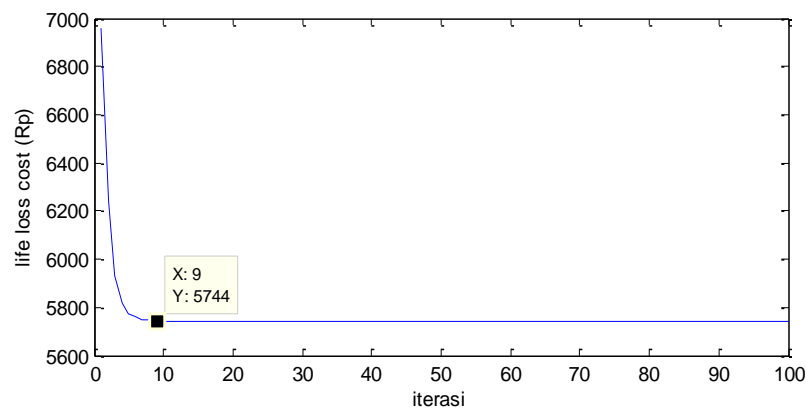
Gambar 4.14 Grafik konvergensi *life loss cost* pada studi kasus I

Tabel 4.6 Hasil Simulasi dengan Satu Fungsi Objektif pada Studi Kasus II

Fungsi Objektif	Biaya Pembangkitan		<i>Life Loss Cost</i>	
<b>Pembangkitan</b>	3442,76 kW	1681,69 kVAR	3443,62 kW	1702,62 kVAR
<b>Beban</b>	3435,42 kW	1262,63 kVAR	3435,42 kW	1262,63 kVAR
<b>Kerugian</b>	7,46 kW	419,99 kVAR	8,27 kW	440,74 kVAR
<b>Kerugian Umur Baterai</b>	0,59%		0,43%	
<b>Biaya Pembangkitan</b>	Rp	9.268.013,18	Rp	11.352.554,74
<b><i>Life Loss Cost</i></b>	Rp	7.816,65	Rp	5.743,96



Gambar 4.15 Grafik konvergensi biaya pembangkitan pada studi kasus II



Gambar 4.16 Grafik konvergensi *life loss cost* pada studi kasus II

Tabel 4.5 dan Tabel 4.6 menunjukkan pengaruh fungsi objektif satu terhadap fungsi objektif yang lain. Dari kedua studi kasus menunjukkan hasil yang sama, biaya pembangkitan dan *life loss cost* memiliki nilai yang berkebalikan. Ketika biaya pembangkitan diminimalkan, maka *life loss cost* baterai dari sistem ini akan menjadi mahal dan tentunya kerugian umur baterai yang tinggi. Sebaliknya, bila *life loss cost* diminimalkan, maka biaya pembangkitan pada sistem ini akan semakin mahal. Grafik konvergensi dari keempat kondisi menunjukkan bahwa dengan menggunakan metode SAMFA, masing-masing fungsi objektif dapat konvergen pada iterasi ke-5 dan 7 pada studi kasus I dan pada iterasi ke-6 dan 9 pada studi kasus II.

#### 4.5.1. Penyelesaian *Multiobjective* Menggunakan Metode PSO

Penyelesaian *multiobjective* menggunakan metode PSO ini digunakan sebagai pembanding metode utama dalam penelitian ini, yaitu metode SAMFA. Daya yang dibangkitkan, kebutuhan beban, dan kerugian dari hasil simulasi operasi sistem selama 24 jam ditunjukkan oleh Tabel 4.7 Tabel 4.8 menunjukkan hasil simulasi *multiobjective* menggunakan metode PSO pada studi kasus I.

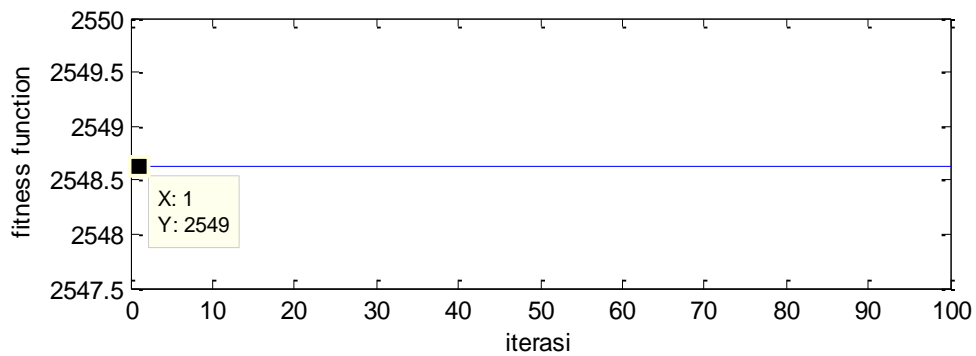
Tabel 4.7 Daya Pembangkitan, Beban, dan Kerugian 24 Jam pada Studi Kasus I Metode PSO

Jam	Beban		Pembangkitan		Kerugian	
	(kW)	(kVAR)	(kW)	(kVAR)	(kW)	(kVAR)
1:00	85,020	37,860	85,116	46,742	0,098	8,893
2:00	56,680	25,240	56,709	26,597	0,029	1,358
3:00	42,510	18,930	42,526	19,684	0,016	0,754
4:00	49,595	22,085	49,617	23,118	0,022	1,034
5:00	56,680	25,240	56,709	26,596	0,029	1,358
6:00	113,360	50,480	113,503	64,017	0,146	13,559
7:00	164,372	73,196	164,570	93,856	0,207	20,710
8:00	220,445	53,635	220,731	72,479	0,289	18,942
9:00	113,360	50,480	113,509	71,136	0,150	20,749
10:00	141,700	63,100	141,820	87,471	0,141	24,529
11:00	162,955	72,565	163,261	117,383	0,307	44,819
12:00	155,870	69,410	156,102	101,811	0,256	32,656
13:00	127,530	56,790	127,636	71,388	0,111	14,653
14:00	155,870	69,410	156,066	90,024	0,205	20,663
15:00	170,040	75,720	170,280	99,519	0,252	23,862
16:00	198,380	88,340	198,510	102,987	0,139	14,689
17:00	184,210	82,030	184,731	109,851	0,532	27,903
18:00	170,040	75,720	170,357	84,785	0,317	9,071
19:00	141,700	63,100	141,905	69,616	0,206	6,526
20:00	113,360	50,480	113,608	57,861	0,250	7,400
21:00	99,190	44,170	99,371	49,576	0,182	5,417
22:00	85,020	37,860	85,150	41,867	0,131	4,013
23:00	170,850	31,550	171,215	48,688	0,370	17,213
0:00	56,680	25,240	56,724	29,942	0,049	4,718
<b>Total</b>	3035,417	1262,631	3039,729	1606,993	4,434	345,491
<b>Min</b>	42,510	18,930	42,526	19,684	0,016	0,754
<b>Max</b>	220,445	88,340	220,731	117,383	0,532	44,819
<b>Mean</b>	126,476	52,610	126,655	66,958	0,185	14,395

Pada Tabel 4.8 ditunjukkan pula kerugian umur baterai, biaya pembangkitan dan *lifeloss cost* pada studi kasus I. Grafik konvergensi penyelesaian *multiobjective* pada studi kasus ini menggunakan metode PSO ditunjukkan oleh Gambar 4.17.

Tabel 4.8 Penyelesaian *Multiobjective* Menggunakan Metode PSO pada Studi Kasus I

Jam	Kerugian Umur Baterai	Biaya Pembangkitan	Life Loss Cost	Fitness Value
1:00	0,029%	Rp 24.131,37	Rp 380,79	11,775
2:00	0,000%	Rp 126.151,98	Rp -	61,557
3:00	0,000%	Rp 96.552,05	Rp -	47,113
4:00	0,000%	Rp 111.350,97	Rp -	54,335
5:00	0,000%	Rp 126.151,98	Rp -	61,557
6:00	0,038%	Rp 41.429,69	Rp 501,37	20,216
7:00	0,042%	Rp 108.897,88	Rp 552,11	53,138
8:00	0,038%	Rp 372.374,06	Rp 501,35	181,703
9:00	0,000%	Rp 110.490,08	Rp -	53,914
10:00	0,000%	Rp 157.447,44	Rp -	76,828
11:00	0,000%	Rp 155.732,91	Rp -	75,991
12:00	0,000%	Rp 163.993,21	Rp -	80,022
13:00	0,000%	Rp 155.963,19	Rp -	76,103
14:00	0,042%	Rp 95.887,19	Rp 551,80	46,789
15:00	0,046%	Rp 111.729,56	Rp 603,10	54,519
16:00	0,049%	Rp 205.259,81	Rp 654,08	100,158
17:00	0,077%	Rp 57.857,96	Rp 1.021,40	28,232
18:00	0,024%	Rp 705.692,77	Rp 311,75	344,348
19:00	0,014%	Rp 700.603,29	Rp 182,97	341,865
20:00	0,024%	Rp 361.831,54	Rp 321,99	176,558
21:00	0,019%	Rp 359.284,75	Rp 258,15	175,316
22:00	0,014%	Rp 356.741,03	Rp 185,26	174,074
23:00	0,095%	Rp 499.560,37	Rp 1.263,50	243,764
0:00	0,029%	Rp 17.946,25	Rp 387,41	8,757
<b>Total</b>	0,580%	Rp 5.223.061,33	Rp 7.677,05	2548,632
<b>Min</b>	0,000%	Rp 17.946,25	Rp -	8,757
<b>Max</b>	0,095%	Rp 705.692,77	Rp 1.263,50	344,348
<b>Mean</b>	0,024%	Rp 217,627,56	Rp 319,88	106,193



Gambar 4.17 Grafik konvergensi pada studi kasus I menggunakan metode PSO

Sebagai pembandingan studi kasus I, ditampilkan pula penyelesaian *multiobjective* pada studi kasus II dengan menggunakan metode yang sama, yaitu PSO. Tabel 4.9 menunjukkan daya beban, pembangkitan dan kerugian selama 24 jam.

Tabel 4.9 Daya Pembangkitan, Beban, dan Kerugian 24 Jam pada Studi Kasus II Metode PSO

Jam	Load		Generation		Kerugian	
	(kW)	(kVAR)	(kW)	(kVAR)	(kW)	(kVAR)
1:00	85,020	37,860	85,115	46,555	0,096	8,706
2:00	56,680	25,240	56,710	26,594	0,030	1,356
3:00	42,510	18,930	42,527	19,684	0,017	0,755
4:00	49,595	22,085	49,617	23,121	0,022	1,037
5:00	56,680	25,240	56,709	26,598	0,029	1,359
6:00	113,360	50,480	113,524	57,412	0,164	6,940
7:00	164,372	73,196	164,546	81,820	0,175	8,647
8:00	220,445	53,635	221,097	83,588	0,652	29,953
9:00	213,360	50,480	213,558	70,947	0,200	20,565
10:00	241,700	63,100	242,316	109,498	0,616	46,399
11:00	162,955	72,565	163,147	106,546	0,192	33,981
12:00	255,870	69,410	256,139	109,885	0,269	40,475
13:00	227,530	56,790	228,112	93,534	0,582	36,744
14:00	155,870	69,410	156,059	88,984	0,198	19,620
15:00	170,040	75,720	170,246	97,748	0,216	22,086
16:00	198,380	88,340	198,713	98,204	0,334	9,876
17:00	184,210	82,030	184,535	91,869	0,325	9,844
18:00	170,040	75,720	170,314	84,226	0,274	8,511
19:00	141,700	63,100	141,905	69,616	0,206	6,526

Lanjutan Tabel 4.9

Jam	Load		Generation		Kerugian	
	(kW)	(kVAR)	(kW)	(kVAR)	(kW)	(kVAR)
20:00	113,360	50,480	113,771	67,139	0,440	16,875
21:00	99,190	44,170	99,504	56,714	0,330	12,662
22:00	85,020	37,860	85,250	46,929	0,238	9,128
23:00	170,850	31,550	171,838	81,669	0,989	50,131
0:00	56,680	25,240	56,724	29,942	0,049	4,718
<b>Total</b>	3435,417	1262,631	3441,976	1668,822	6,642	406,895
<b>Min</b>	42,510	18,930	42,527	19,684	0,017	0,755
<b>Max</b>	255,870	88,340	256,139	109,885	0,989	50,131
<b>Mean</b>	143,142	52,610	143,416	69,534	0,277	16,954

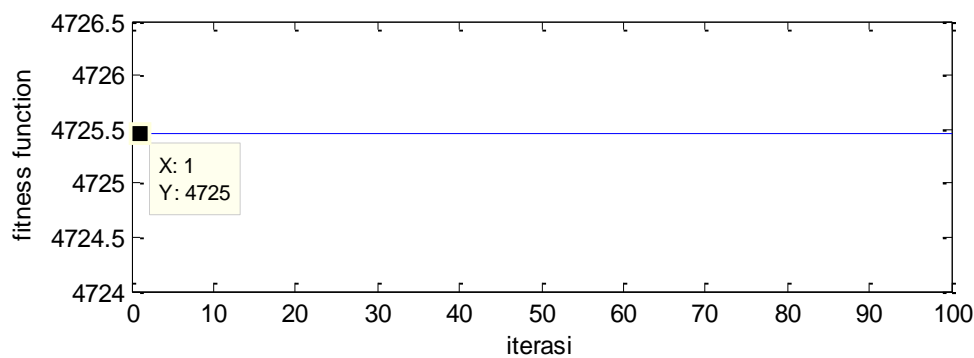
Pada Tabel 4.10 ditunjukkan pula kerugian umur baterai, biaya pembangkitan dan *lifeloss cost* pada studi kasus II. Grafik konvergensi penyelesaian *multiobjective* pada studi kasus ini menggunakan metode PSO ditunjukkan oleh Gambar 4.18

Tabel 4.10 Penyelesaian *Multiobjective* Menggunakan Metode PSO pada Studi Kasus II

Jam	Kerugian Umur Baterai	Biaya Pembangkitan	Life Loss Cost	Fitness Value
1:00	0,044%	Rp 25.830,49	Rp 580,34	12,604
2:00	0,000%	Rp 126.152,35	Rp -	61,557
3:00	0,000%	Rp 96.552,21	Rp -	47,113
4:00	0,000%	Rp 111.351,01	Rp -	54,335
5:00	0,000%	Rp 126.151,99	Rp -	61,557
6:00	0,000%	Rp 554.408,76	Rp -	270,528
7:00	0,000%	Rp 552.531,58	Rp -	269,612
8:00	0,051%	Rp 373.138,48	Rp 668,84	182,076
9:00	0,049%	Rp 307.882,56	Rp 642,89	150,234
10:00	0,047%	Rp 318.339,96	Rp 617,92	155,336
11:00	0,000%	Rp 184.135,30	Rp -	89,850
12:00	0,045%	Rp 321.742,29	Rp 591,97	156,997
13:00	0,043%	Rp 321.490,79	Rp 566,99	156,874
14:00	0,049%	Rp 106.553,61	Rp 642,89	51,994
15:00	0,052%	Rp 113.910,97	Rp 693,82	55,584
16:00	0,036%	Rp 549.850,38	Rp 480,57	268,304
17:00	0,027%	Rp 852.355,21	Rp 361,77	415,913

Lanjutan Tabel 4.10

Jam	Kerugian Umur Baterai	Biaya Pembangkitan	Life Loss Cost	Fitness Value
18:00	0,024%	Rp 818.108,39	Rp 314,58	399,202
19:00	0,019%	Rp 700.603,29	Rp 250,69	341,865
20:00	0,000%	Rp 751.321,93	Rp -	366,613
21:00	0,000%	Rp 658.085,08	Rp -	321,118
22:00	0,000%	Rp 564.930,10	Rp -	275,662
23:00	0,049%	Rp 1.130.806,18	Rp 642,89	551,785
0:00	0,029%	Rp 17.946,25	Rp 381,06	8,757
<b>Total</b>	0,562%	Rp 9.684.179,16	Rp 7.437,23	4725,468
<b>Min</b>	0,000%	Rp 17.946,25	Rp -	8,757
<b>Max</b>	0,052%	Rp 1,130,806,18	Rp 693,82	551,785
<b>Mean</b>	0,023%	Rp 403,507,47	Rp 309,88	196,894



Gambar 4.18 Grafik konvergensi pada studi kasus II menggunakan metode PSO

#### 4.5.2. Penyelesaian *Multiobjective* Menggunakan Metode FA

Penyelesaian *multiobjective* menggunakan metode FA ini digunakan sebagai pembanding metode utama dalam penelitian ini, yaitu metode SAMFA. Daya yang dibangkitkan, kebutuhan beban, dan kerugian dari hasil simulasi operasi sistem selama 24 jam ditunjukkan oleh Tabel 4.11. Tabel 4.12 menunjukkan hasil simulasi *multiobjective* menggunakan metode FA pada studi kasus I. Tabel 4.12 ini juga menunjukkan kerugian umur baterai, biaya pembangkitan dan *lifeloss cost* pada studi kasus II. Grafik konvergensi penyelesaian *multiobjective* pada studi kasus ini menggunakan metode FA ditunjukkan oleh Gambar 4.19.

Tabel 4.11 Daya Pembangkitan, Beban, dan Kerugian 24 Jam pada Studi Kasus I Metode FA

Jam	Load		Generation		Kerugian	
	(kW)	(kVAR)	(kW)	(kVAR)	(kW)	(kVAR)
1:00	85,020	37,860	85,105	45,806	0,087	7,956
2:00	56,680	25,240	56,709	26,597	0,029	1,358
3:00	42,510	18,930	42,527	19,701	0,017	0,772
4:00	49,595	22,085	49,618	23,142	0,023	1,058
5:00	56,680	25,240	56,709	26,602	0,030	1,363
6:00	113,360	50,480	113,413	55,736	0,054	5,260
7:00	164,372	73,196	164,547	91,061	0,182	17,904
8:00	220,445	53,635	220,727	72,435	0,285	18,897
9:00	113,360	50,480	113,472	65,524	0,113	15,095
10:00	141,700	63,100	141,786	84,110	0,108	21,148
11:00	162,955	72,565	163,181	106,369	0,226	33,804
12:00	155,870	69,410	156,092	94,757	0,235	25,501
13:00	127,530	56,790	127,659	78,372	0,146	21,699
14:00	155,870	69,410	155,945	78,777	0,077	9,381
15:00	170,040	75,720	170,275	98,007	0,245	22,341
16:00	198,380	88,340	198,539	102,393	0,166	14,089
17:00	184,210	82,030	184,798	108,007	0,597	26,051
18:00	170,040	75,720	170,426	96,514	0,393	20,846
19:00	141,700	63,100	142,133	76,141	0,439	13,101
20:00	113,360	50,480	113,607	57,829	0,249	7,368
21:00	99,190	44,170	99,368	49,677	0,180	5,518
22:00	85,020	37,860	85,155	42,157	0,135	4,303
23:00	170,850	31,550	171,210	48,732	0,365	17,258
0:00	56,680	25,240	56,724	29,942	0,049	4,718
<b>Total</b>	3035,417	1262,631	3039,726	1578,386	4,428	316,789
<b>Min</b>	42,510	18,930	42,527	19,701	0,017	0,772
<b>Max</b>	220,445	88,340	220,727	108,007	0,597	33,804
<b>Mean</b>	126,476	52,610	126,655	65,766	0,184	13,200

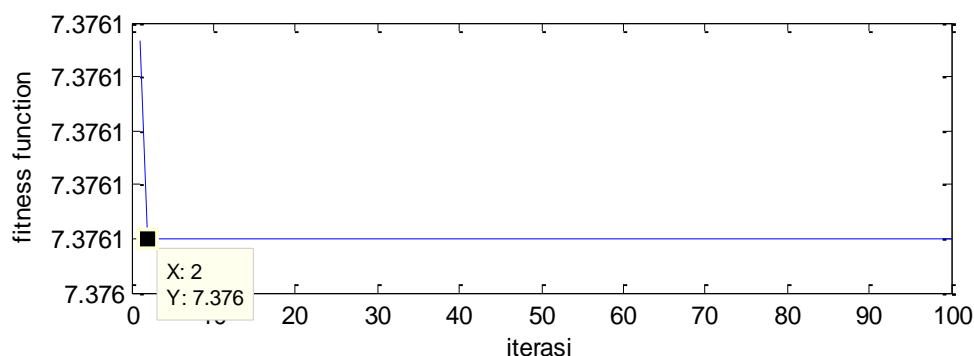
Tabel 4.12 Penyelesaian *Multiobjective* Menggunakan Metode FA pada Studi Kasus I

Jam	Kerugian Umur Baterai	Biaya Pembangkitan	Life Loss Cost	Fitness Value
1:00	0,027%	Rp 31.887,61	Rp 360,76	0,170
2:00	0,000%	Rp 126.151,98	Rp -	0,119
3:00	0,000%	Rp 96.552,53	Rp -	0,091
4:00	0,000%	Rp 111.351,80	Rp -	0,105
5:00	0,000%	Rp 126.152,06	Rp -	0,119



Lanjutan Tabel 4.12

Jam	Kerugian Umur Baterai	Biaya Pembangkitan	Life Loss Cost	Fitness Value
6:00	0,022%	Rp 114.612,90	Rp 288,99	0,220
7:00	0,037%	Rp 124.536,37	Rp 486,59	0,306
8:00	0,036%	Rp 372.366,06	Rp 475,26	0,536
9:00	0,000%	Rp 129.900,51	Rp -	0,123
10:00	0,000%	Rp 177.732,79	Rp -	0,168
11:00	0,000%	Rp 177.121,82	Rp -	0,167
12:00	0,000%	Rp 184.595,40	Rp -	0,174
13:00	0,000%	Rp 142.527,88	Rp -	0,135
14:00	0,024%	Rp 166.966,50	Rp 320,81	0,282
15:00	0,040%	Rp 124.315,84	Rp 530,84	0,323
16:00	0,041%	Rp 224.264,17	Rp 549,10	0,425
17:00	0,068%	Rp 68.662,61	Rp 893,84	0,412
18:00	0,071%	Rp 71.447,02	Rp 936,97	0,431
19:00	0,036%	Rp 370.475,59	Rp 471,20	0,533
20:00	0,026%	Rp 365.554,34	Rp 338,80	0,477
21:00	0,016%	Rp 417.555,46	Rp 218,29	0,479
22:00	0,012%	Rp 397.374,07	Rp 155,57	0,436
23:00	0,094%	Rp 524.801,21	Rp 1.244,62	0,979
0:00	0,029%	Rp 17.946,25	Rp 378,30	0,164
<b>Total</b>	0,578%	Rp 4.664.852,79	Rp 7.649,93	7,376
<b>Min</b>	0,000%	Rp 17.946,25	Rp -	0,091
<b>Max</b>	0,094%	Rp 524.801,21	Rp 1.244,62	0,979
<b>Mean</b>	0,024%	Rp 194.368,87	Rp 318,75	0,307



Gambar 4.19 Grafik konvergensi pada studi kasus I menggunakan metode FA

Sebagai pembanding studi kasus I, ditampilkan pula penyelesaian *multiobjective* pada studi kasus II dengan menggunakan metode yang sama, yaitu

FA. Tabel 4.12 menunjukkan daya beban, pembangkitan dan kerugian selama 24 jam. Sedangkan *fitness value* dari penyelesaian operasi optimum menggunakan metode FA ini ditunjukkan oleh Tabel 4.13.

Tabel 4.13 Daya Pembangkitan, Beban, dan Kerugian 24 Jam pada Studi Kasus II Metode FA

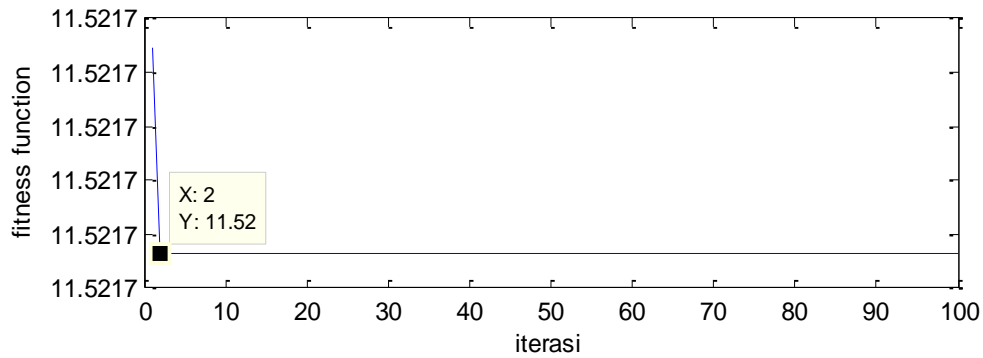
Jam	Load		Generation		Kerugian	
	(kW)	(kVAR)	(kW)	(kVAR)	(kW)	(kVAR)
1:00	85,020	37,860	85,103	45,610	0,085	7,759
2:00	56,680	25,240	56,709	26,599	0,030	1,361
3:00	42,510	18,930	42,526	19,692	0,016	0,762
4:00	49,595	22,085	49,618	23,117	0,023	1,033
5:00	56,680	25,240	56,709	26,598	0,029	1,360
6:00	113,360	50,480	113,574	58,923	0,215	8,450
7:00	164,372	73,196	164,634	84,289	0,263	11,118
8:00	220,445	53,635	221,093	83,527	0,648	29,892
9:00	213,360	50,480	213,551	70,619	0,192	20,235
10:00	241,700	63,100	242,365	103,693	0,665	40,593
11:00	162,955	72,565	163,206	111,497	0,251	38,932
12:00	255,870	69,410	256,100	105,566	0,270	36,478
13:00	227,530	56,790	228,112	93,534	0,582	36,744
14:00	155,870	69,410	156,017	82,351	0,151	12,961
15:00	170,040	75,720	170,154	87,537	0,117	11,836
16:00	198,380	88,340	198,516	102,718	0,144	14,418
17:00	184,210	82,030	184,740	97,874	0,531	15,867
18:00	170,040	75,720	170,477	88,351	0,437	12,649
19:00	141,700	63,100	142,417	90,663	0,717	27,564
20:00	113,360	50,480	113,771	67,139	0,440	16,875
21:00	99,190	44,170	99,504	56,714	0,330	12,662
22:00	85,020	37,860	85,250	46,929	0,238	9,128
23:00	170,850	31,550	171,838	81,669	0,989	50,131
0:00	56,680	25,240	56,724	29,942	0,049	4,718
<b>Total</b>	3435,417	1262,631	3442,710	1685,150	7,412	423,527
<b>Min</b>	42,510	18,930	42,526	19,692	0,016	0,762
<b>Max</b>	255,870	88,340	256,100	111,497	0,989	50,131
<b>Mean</b>	143,142	52,610	143,446	70,215	0,309	17,647

Pada Tabel 4.14 ini ditunjukkan pula kerugian umur baterai, biaya pembangkitan dan *lifeloss cost* pada studi kasus II. Grafik konvergensi

penyelesaian *multiobjective* pada studi kasus ini menggunakan metode FA ditunjukkan oleh Gambar 4.20.

Tabel 4.14 Penyelesaian *Multiobjective* Menggunakan Metode FA pada Studi Kasus II

Jam	Kerugian Umur Bateriai	Biaya Pembangkitan	Life Loss Cost	Fitness Value
1:00	0,042%	Rp 33.647,68	Rp 550,16	0,245
2:00	0,000%	Rp 126.152,00	Rp -	0,119
3:00	0,000%	Rp 96.552,15	Rp -	0,091
4:00	0,000%	Rp 111.351,35	Rp -	0,105
5:00	0,000%	Rp 126.151,99	Rp -	0,119
6:00	0,000%	Rp 594.576,94	Rp -	0,562
7:00	0,000%	Rp 619.845,48	Rp -	0,586
8:00	0,051%	Rp 373.130,17	Rp 668,84	0,612
9:00	0,048%	Rp 308.781,33	Rp 640,80	0,540
10:00	0,047%	Rp 339.567,47	Rp 617,92	0,561
11:00	0,000%	Rp 167.920,40	Rp -	0,159
12:00	0,045%	Rp 334.197,21	Rp 589,87	0,545
13:00	0,043%	Rp 321.490,79	Rp 566,99	0,524
14:00	0,034%	Rp 159.525,61	Rp 445,09	0,323
15:00	0,030%	Rp 191.343,11	Rp 390,98	0,332
16:00	0,052%	Rp 210.336,90	Rp 687,24	0,465
17:00	0,046%	Rp 489.539,50	Rp 605,94	0,698
18:00	0,044%	Rp 490870,10	Rp 585,96	0,691
19:00	0,000%	Rp 938.532,55	Rp -	0,887
20:00	0,000%	Rp 751.321,93	Rp -	0,710
21:00	0,000%	Rp 658.085,08	Rp -	0,622
22:00	0,000%	Rp 564.930,10	Rp -	0,534
23:00	0,049%	Rp 1.130.806,18	Rp 655,06	1,323
0:00	0,029%	Rp 17.946,25	Rp 387,96	0,167
<b>Total</b>	0,558%	Rp 9.156.602,26	Rp 7.392,82	11,522
<b>Min</b>	0,000%	Rp 17.946,25	Rp -	0,091
<b>Max</b>	0,052%	Rp 1.130.806,18	Rp 687,24	1,323
<b>Mean</b>	0,023%	Rp 381.525,09	Rp 308,03	0,480



Gambar 4.20 Grafik konvergensi pada studi kasus II menggunakan metode FA

#### 4.5.3. Penyelesaian *Multiobjective* Menggunakan Metode SAMFA

Penyelesaian *multiobjective* ini menggunakan metode SAMFA. Sebagai pembanding, digunakan metode PSO dan FA seperti yang telah dibahas pada sub bab 4.5.1 dan 4.5.2. Daya yang dibangkitkan, kebutuhan beban, dan kerugian dari hasil simulasi operasi sistem selama 24 jam ditunjukkan oleh Tabel 4.15. Tabel 4.16 menunjukkan hasil simulasi *multiobjective* menggunakan metode SAMFA pada studi kasus I.

Tabel 4.15 Daya Pembangkitan, Beban, dan Kerugian 24 Jam pada Studi Kasus I Metode SAMFA

Jam	Pembangkitan		Beban		Kerugian	
	(Kw)	(Kvar)	(Kw)	(Kvar)	(Kw)	(Kvar)
1:00	85,104	45,675	85,020	37,860	0,085	7,824
2:00	56,709	26,597	56,680	25,240	0,029	1,358
3:00	42,526	19,686	42,510	18,930	0,016	0,756
4:00	49,617	23,118	49,595	22,085	0,022	1,034
5:00	56,709	26,597	56,680	25,240	0,029	1,358
6:00	113,414	56,010	113,360	50,480	0,055	5,535
7:00	164,453	78,879	164,372	73,196	0,082	5,691
8:00	120,499	61,328	120,445	53,635	0,054	7,710
9:00	113,489	69,104	113,360	50,480	0,129	18,703
10:00	141,914	96,082	141,700	63,100	0,214	32,982
11:00	163,264	114,823	162,955	72,565	0,309	42,258
12:00	156,106	104,543	155,870	69,410	0,236	35,133
13:00	127,680	80,936	127,530	56,790	0,167	24,284
14:00	155,947	76,714	155,870	69,410	0,078	7,312
15:00	170,160	87,882	170,040	75,720	0,124	12,182

Lanjutan Tabel 4.15

Jam	Pembangkitan		Beban		Kerugian	
	(Kw)	(Kvar)	(Kw)	(Kvar)	(Kw)	(Kvar)
16:00	198,537	101,969	198,380	88,340	0,164	13,665
17:00	184,774	104,163	184,210	82,030	0,570	22,189
18:00	170,588	98,531	170,040	75,720	0,556	22,881
19:00	142,302	88,128	141,700	63,100	0,603	25,029
20:00	113,608	57,861	113,360	50,480	0,250	7,400
21:00	99,371	49,576	99,190	44,170	0,182	5,417
22:00	85,150	41,867	85,020	37,860	0,131	4,013
23:00	171,212	48,699	170,850	31,550	0,367	17,224
0:00	56,724	29,942	56,680	25,240	0,049	4,718
<b>Total</b>	2939,859	1588,709	2935,417	1262,631	4,503	326,655
<b>Min</b>	42,526	19,686	42,510	18,930	0,016	0,756
<b>Max</b>	198,537	114,823	198,380	88,340	0,603	42,258
<b>Mean</b>	122,494	66,196	122,309	52,610	0,188	13,611

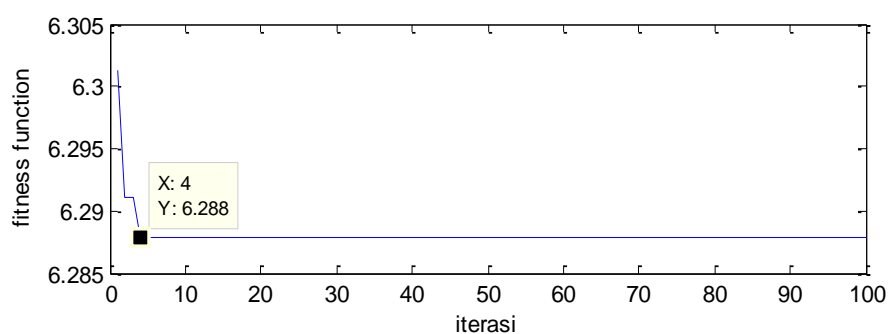
Pada Tabel 4.16 ini ditunjukkan pula kerugian umur baterai, biaya pembangkitan dan *lifeloss cost* pada studi kasus I. Grafik konvergensi penyelesaian *multiobjective* pada studi kasus ini menggunakan metode SAMFA ditunjukkan oleh Gambar 4.21.

Tabel 4.16 Penyelesaian *Multiobjective* Menggunakan Metode SAMFA pada Studi Kasus I

Jam	Fitness Value	Kerugian Umur Baterai	Biaya Pembangkitan	Life Loss Cost
1:00	0,1955908	0,027%	Rp 33.028,72	Rp 357,82
2:00	0,0883064	0,000%	Rp 126.151,98	Rp -
3:00	0,0675864	0,000%	Rp 96.552,00	Rp -
4:00	0,0779456	0,000%	Rp 111.350,88	Rp -
5:00	0,0883064	0,000%	Rp 126.151,98	Rp -
6:00	0,2264072	0,024%	Rp 108.386,54	Rp 312,32
7:00	0,2515681	0,011%	Rp 256.814,64	Rp 148,96
8:00	0,1226957	0,000%	Rp 175.279,52	Rp -
9:00	0,0833539	0,000%	Rp 119.077,00	Rp -
10:00	0,0970021	0,000%	Rp 138.574,49	Rp -
11:00	0,1140231	0,000%	Rp 162.890,07	Rp -
12:00	0,112369	0,000%	Rp 160.527,08	Rp -
13:00	0,0904027	0,000%	Rp 129.146,71	Rp -

Lanjutan Tabel 4.16

Jam	Fitness Value	Kerugian Umur Baterai	Biaya Pembangkitan	Life Loss Cost
14:00	0,2543184	0,017%	Rp 209.891,34	Rp 222,81
15:00	0,3001064	0,026%	Rp 189.440,53	Rp 347,51
16:00	0,4293443	0,042%	Rp 226.850,20	Rp 561,31
17:00	0,4434434	0,059%	Rp 94.122,14	Rp 783,32
18:00	0,4784146	0,068%	Rp 59.651,27	Rp 905,93
19:00	0,4317587	0,064%	Rp 33.254,46	Rp 847,47
20:00	0,426542	0,027%	Rp 361.831,54	Rp 359,46
21:00	0,3897841	0,022%	Rp 359.284,75	Rp 286,90
22:00	0,3486653	0,016%	Rp 356.741,03	Rp 205,28
23:00	0,9774946	0,097%	Rp 511.773,38	Rp 1.284,76
0:00	0,1923907	0,028%	Rp 17.946,25	Rp 373,09
<b>Total</b>	6,288	0,528%	Rp 4.164.718,53	Rp 6.996,92
<b>Min</b>	0,068	0,000%	Rp 17.946,25	Rp -
<b>Max</b>	0,977	0,097%	Rp 511.773,38	Rp 1.284,76
<b>Mean</b>	0,262	0,022%	Rp 173.529,94	Rp 291,54



Gambar 4.21 Grafik konvergensi pada studi kasus I menggunakan metode SAMFA

Sebagai pembanding studi kasus I, ditampilkan pula penyelesaian *multiobjective* pada studi kasus II dengan menggunakan metode yang sama, yaitu SAMFA. Tabel 4.17 menunjukkan daya beban, pembangkitan dan kerugian selama 24 jam. Sedangkan *fitness value* dari penyelesaian operasi optimum menggunakan metode SAMFA ini ditunjukkan oleh Tabel 4.18.

Pada Tabel 4.18 ini ditunjukkan pula kerugian umur baterai, biaya pembangkitan dan *lifeloss cost* pada studi kasus II. Grafik konvergensi penyelesaian *multiobjective* pada studi kasus ini menggunakan metode SAMFA ditunjukkan oleh Gambar 4.22.

Tabel 4.17 Daya Pembangkitan, Beban, dan Kerugian 24 Jam pada Studi Kasus II Metode SAMFA

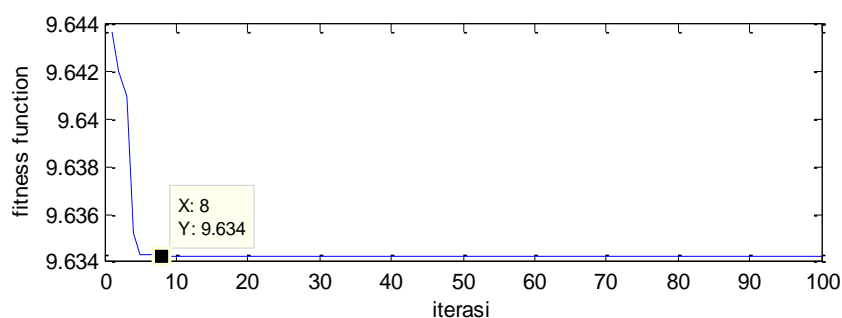
Jam	Pembangkitan		Beban		Kerugian	
	(Kw)	(Kvar)	(Kw)	(Kvar)	(Kw)	(Kvar)
1:00	85,105	45,741	85,020	37,860	0,086	7,890
2:00	56,709	26,596	56,680	25,240	0,029	1,358
3:00	42,526	19,685	42,510	18,930	0,016	0,756
4:00	49,617	23,119	49,595	22,085	0,022	1,034
5:00	56,709	26,594	56,680	25,240	0,030	1,355
6:00	113,507	56,819	113,360	50,480	0,147	6,346
7:00	164,624	84,474	164,372	73,196	0,253	11,302
8:00	221,097	83,588	220,445	53,635	0,652	29,953
9:00	213,565	71,230	213,360	50,480	0,207	20,852
10:00	242,367	111,178	241,700	63,100	0,667	48,079
11:00	163,167	107,072	162,955	72,565	0,212	34,507
12:00	256,152	110,297	255,870	69,410	0,282	40,887
13:00	228,112	93,534	227,530	56,790	0,582	36,744
14:00	155,954	77,415	155,870	69,410	0,086	8,014
15:00	170,149	86,751	170,040	75,720	0,112	11,049
16:00	198,499	97,930	198,380	88,340	0,124	9,614
17:00	184,659	95,510	184,210	82,030	0,450	13,496
18:00	170,504	89,172	170,040	75,720	0,465	13,475
19:00	142,136	76,220	141,700	63,100	0,441	13,181
20:00	113,771	67,139	113,360	50,480	0,440	16,875
21:00	99,504	56,714	99,190	44,170	0,330	12,662
22:00	85,250	46,929	85,020	37,860	0,238	9,128
23:00	171,838	81,669	170,850	31,550	0,989	50,131
0:00	56,724	29,942	56,680	25,240	0,049	4,718
<b>Total</b>	3442,246	1665,316	3435,417	1262,631	6,907	403,407
<b>Min</b>	42,526	19,685	42,510	18,930	0,016	0,756
<b>Max</b>	256,152	111,178	255,870	88,340	0,989	50,131
<b>Mean</b>	143,427	69,388	143,142	52,610	0,288	16,809

Tabel 4.18 Penyelesaian *Multiobjective* Menggunakan Metode SAMFA pada Studi Kasus II

Jam	Fitness Value	Kerugian Umur Baterai	Biaya Pembangkitan	Life Loss Cost
1:00	0,29001	0,042%	Rp 32.541,33	Rp 554,42
2:00	0,0883064	0,000%	Rp 126.151,98	Rp -
3:00	0,0675864	0,000%	Rp 96.552,00	Rp -
4:00	0,0779457	0,000%	Rp 111.350,97	Rp -
5:00	0,0883065	0,000%	Rp 126.152,09	Rp -

Lanjutan Tabel 4.18

Jam	Fitness Value	Kerugian Umur Baterai	Biaya Pembangkitan	Life Loss Cost
6:00	0,3531139	0,000%	Rp 504.448,36	Rp -
7:00	0,378829	0,000%	Rp 541.184,34	Rp -
8:00	0,5835781	0,051%	Rp 373.138,29	Rp 668,84
9:00	0,5239606	0,048%	Rp 307.075,13	Rp 641,10
10:00	0,5207482	0,047%	Rp 318.446,29	Rp 617,92
11:00	0,1279975	0,000%	Rp 182.853,50	Rp -
12:00	0,5096969	0,045%	Rp 321.763,50	Rp 590,17
13:00	0,4983337	0,043%	Rp 321.490,79	Rp 566,99
14:00	0,2846141	0,024%	Rp 191.603,30	Rp 312,22
15:00	0,3356262	0,031%	Rp 195.094,89	Rp 412,99
16:00	0,4272146	0,038%	Rp 262.608,99	Rp 504,95
17:00	0,6198708	0,041%	Rp 512.590,77	Rp 541,61
18:00	0,6228595	0,047%	Rp 457.086,65	Rp 628,42
19:00	0,5619434	0,048%	Rp 366.934,59	Rp 632,97
20:00	0,5259253	0,000%	Rp 751.321,93	Rp -
21:00	0,4606596	0,000%	Rp 658.085,08	Rp -
22:00	0,3954511	0,000%	Rp 564.930,10	Rp -
23:00	1,0976261	0,048%	Rp 1.130.806,18	Rp 634,98
0:00	0,1940719	0,028%	Rp 17.946,25	Rp 376,58
<b>Total</b>	9,634	0,580%	Rp 8.472.157,31	Rp 7.684,16
<b>Min</b>	0,068	0,000%	Rp 17.946,25	Rp -
<b>Max</b>	1,098	0,051%	Rp 1.130.806,18	Rp 668,84
<b>Mean</b>	0,401	0,024%	Rp 353.006,55	Rp 320,17



Gambar 4.22 Grafik konvergensi pada studi kasus II menggunakan metode SAMFA



#### 4.5.4. Perbandingan Hasil Penyelesaian *Multiobjective* menggunakan Metode SAMFA, FA, dan PSO

Perbandingan dari hasil penyelesaian *multiobjective* untuk meminimalkan biaya pembangkitan dan kerugian umur baterai pada studi kasus I ditunjukkan oleh Tabel 4.19. Sedangkan perbandingan dari hasil penyelesaian *multiobjective* pada studi kasus II ditunjukkan oleh Tabel 4.20.

Tabel 4.19 Perbandingan Hasil Simulasi *Multiobjective* Studi Kasus I

Metode	SAMFA		FA		PSO	
Keterangan:	kW	kVAR	kW	kVAR	kW	kVAR
Pembangkitan	2.939,86	1.588,71	3.039,73	1.578,39	3.039,73	1.606,99
Beban	2.935,42	1.262,63	3.035,42	1.262,63	3.035,42	1.262,63
Kerugian	4,50	326,66	4,43	316,79	4,43	345,49
Kerugian Umur Baterai	0,53%		0,58%		0,58%	
Biaya Pembangkitan	Rp	4.164.718,53	Rp	4.664.852,79	Rp	5.223.061,33
<i>Life Loss Cost</i>	Rp	6.996,92	Rp	7.649,93	Rp	7.677,05
<i>Fitness Value</i>	6,29		7,38		2.548,63	

Tabel 4.20 Perbandingan Hasil Simulasi *Multiobjective* Studi Kasus II

Metode	SAMFA		FA		PSO	
Keterangan:	kW	kVAR	kW	kVAR	kW	kVAR
Pembangkitan	3.442,25	1.665,32	3.442,71	1.685,15	3.441,98	1.668,82
Beban	3.435,42	1.262,63	3.435,42	1.262,63	3.435,42	1.262,63
Kerugian	6,91	403,41	7,41	423,53	6,64	406,90
Kerugian Umur Baterai	0,58%		0,56%		0,56%	
Biaya Pembangkitan	Rp	8.472.157,31	Rp	9.156.602,26	Rp	9.684.179,16
<i>Life Loss Cost</i>	Rp	7.684,16	Rp	7.392,82	Rp	7.437,23
<i>Fitness Value</i>	9,634		11,522		4.725,468	

Tabel 4.18 dan 4.19 menunjukkan bahwa penyelesaian operasi optimum menggunakan metode SAMFA memiliki *fitness value* yang lebih baik bila dibandingkan dengan FA maupun PSO.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **BAB 5**

### **PENUTUP**

#### **5.1. Kesimpulan**

Dari hasil analisis operasi optimum *stand-alone microgrid* dengan mempertimbangkan karakteristik umur baterai menggunakan metode *self-adaptive modifie firefly algorithm* (SAMFA), dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Batasan SOC baterai diperhatikan dalam operasi sistem ini, baik pada kondisi *charging* maupun *discharging* sehingga rugi umur baterai dapat diminimalkan.
2. Berdasarkan analisis operasi optimum dengan meminimalkan satu fungsi objektif diketahui bahwa biaya pembangkitan dan rugi umur baterai merupakan dua hal yang berbanding terbalik. Pada studi kasus I, apabila biaya pembangkitan diminimalkan, maka diperoleh nilai rugi umur baterai sebesar 0,59% dan biaya pembangkitan sebesar Rp5.079.585,99. Apabila rugi umur baterai diminimalkan, maka diperoleh nilai rugi umur baterai sebesar 0,31% dan biaya pembangkitan sebesar Rp7.648.460,43. Sedangkan pada studi kasus II, apabila biaya pembangkitan diminimalkan, maka diperoleh nilai rugi umur baterai sebesar 0,59% dan biaya pembangkitan sebesar Rp9.268.013,18. Apabila rugi umur baterai diminimalkan, maka diperoleh nilai rugi umur baterai sebesar 0,43% dan biaya pembangkitan sebesar Rp11.352.554,74.
3. Hasil operasi optimum menggunakan metode SAMFA telah dibandingkan dengan PSO dan FA. Dari hasil tersebut, diketahui bahwa metode SAMFA memiliki nilai fitness yang paling rendah bila dibandingkan dengan FA dan PSO. Pada studi kasus I, nilai fitness dengan menggunakan metode SAMFA sebesar 6,29, sedangkan nilai fitness dengan menggunakan metode FA dan PSO sebesar 7,38 dan 2.548,63. Pada studi kasus II, nilai fitness dengan menggunakan metode SAMFA sebesar 9,634, sedangkan nilai fitness dengan menggunakan metode FA dan PSO sebesar 11,522 dan 4.275,468.

## 5.2. Saran

Adapun saran untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini diharapkan dapat dikembangkan dengan menggabungkan menggunakan sistem microgrid yang terhubung dengan grid dengan penambahan *security constrain* secara lebih kompleks sehingga dapat diimplementasikan pada *real system*
2. Penelitian ini diharapkan dapat dikembangkan dengan sistem distribusi radial.
3. Penelitian ini diharapkan dapat dikembangkan dengan penambahan *forecasting* data karakteristik *renewable energy* dan beban
4. Penelitian ini diharapkan dapat dikembangkan dengan penggunaan metode SAMFA atau *artificial intelligent* lain untuk penyelesaian EMS

## DAFTAR PUSTAKA

- Allen J. Wood, Power Generation Operation and Control, second edisi tahun 1996
- Bo Zhao, Xuesong Zhang, Jian Chen, Caisheng Wang, dan Li Guo, "Operation Optimization of Standalone *Microgrids* Considering Lifetime Characteristics of *Battery energy storage system*", *IEEE Transactions On Power Systems*, Vol. 4, No. 4, October 2013
- D.V.Yamille., K.V.Ganesh., Mohagheghi, Salman.,J.C. Hernandez.,G.H. Ronald., "Particle Swarm Optimization : Basic Concepts Variants and Application in Power System", *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol.12, No.2, April 2008
- Emiliano Dall'Anese, HaoZhu, Georgios B. Gipsosakis, Fellow. "Distributed *Optimal power flow* for Smart *Microgrids*". *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 4, No. 3, September 2013
- Haihua Zhou, Tanmoy Bhattacharya, Duong Tran, Tuck Sing Terence Siew, Ashwin M. Khambadkone, "Composite *Energy Storage* System Involving *Battery* and *Ultracapacitor* With Dynamic *Energy* Management in *Microgrid* Applications", *IEEE Transactions On Power Electronics*, Vol. 26, No. 3, March 2011
- M. Bashir, J. Sadeh, "Size Optimization of New Hybrid Stand-alone Renewable Energy System Considering a Reliability Index", IEEE. 2012
- M.F. Rahman, Penangsang. O., Soeprijanto .A., "Optimisasi Pembebanan Pembangkit (economic dispatch) Pada sistem 500Kv Jawa-Bali Menggunakan Particle Swarm Optimization dengan Mempertimbangkan Kapasitas Transmisi", Jurusan Teknik Elektro FTI-ITS, Surabaya, 2009
- Mohamed, Faisal A. "Microgrid modelling and online management." (2008).
- Noel Augustine, Sindhu Suresh, Prajakta Moghe, Kashif Sheikh, "Economic Dispatch for a Microgrid Considering Renewable Energy Cost Functions", IEEE. 2011

- Norberto Fueyo, Yosune Sanz, Marcos Rodrigues, Carlos Montanes, Cesar Dopazo, "The use of cost-generation curves for the analysis of wind electricity costs in Spain", ELSEVIER, Applied Energy. Cost Functions. 2010
- Priyanto, Yun Tonce Kusuma. "Combine Active Reactive Dispatch Multiobjective Optimal Power Flow Using Firefly Algorithm", Master Theses of Electrical Engineering, RTE 621.319 Pri p, 2013
- Saadat, Hadi, "Power System Analysis", Mc.Graw Hill, Singapore. 2004
- Sulistijono, Primaditya. "Emission dan Economic Dispatch pada Sistem Kelistrikan Micro Grid Menggunakan Multiobjective Genetic Algorithm Optimization". ITS surabaya. 2013
- Taher Niknam, Rasoul Azizipanah-Abarghooee, and Alireza Roosta, "Reserve Constrained Dynamic Economic Dispatch: A New Fast *Self-adaptive modified firefly algorithm*", *IEEE Systems Journal*, Vol. 6, No. 4, December 2012
- Takehiko Kojima, Yoshifumi Fukuya, "Microgrid System for Isolated Islands", feature issue: Smart Community, Vol. 57 No. 4 FUJI ELECTRIC REVIEW
- Tianpei Zhou, Wei Sun, "Optimization of Battery–Supercapacitor Hybrid Energy Storage Station in Wind/Solar Generation System", *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Vol. 5, No. 2, April 2014
- Tomaso Erseghe, Stefano Tomasin, "Power Flow Optimization for Smart *Microgrids* by SDP Relaxation on Linear Networks", *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 4, No. 2, June 2013
- Xin-She Yang, Firefly Algorithm for Multimodal Optimization, in: stochastic Algorithms: foundations and Applications, SAGA 2009, Lecture Notes in Computer sciences, Vol. 5792, pp. 169-178 (2009).
- Ye Yang, HuiLi, Andreas Aichhorn, Jianping Zheng, and Michael Greenleaf. "Sizing Strategy of Distributed *Battery Storage* System With High Penetration of *Photovoltaic* for Voltage Regulation and Peak Load Shaving". *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 5, No. 2, March 2014
- Yoash Levron, Josep M. Guerrero, "Optimal power flow in *Microgrids* With Energy Storage", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 28, No. 3, August 2013

Zhixin Miao, LingXu, Vahid R. Disfani, Lingling Fan. "An SOC-Based *Battery* Management System for *Microgrids*". *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 5, No. 2, March 2014

## LAMPIRAN 1

### HASIL SIMULASI MENGGUNAKAN METODE PSO

Tabel L.1.1 Daya Pembangkitan, Beban, dan Losses selama 24 Jam menggunakan Metode PSO pada Studi Kasus I

Jam	Pembangkitan (kW)									Load (kW)		Losses (kW)
	DG 1	WT 1	WT 2	DG 2	BAT 1	PV 1	PV 2	BAT 2	Total	Load	Charge	
1:00	0,000	0,271	0,309	0,000	84,536	0,000	0,000	0,000	85,116	85,020	0,000	0,098
2:00	0,000	29,300	27,410	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	56,709	56,680	0,000	0,029
3:00	0,000	21,169	21,357	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	42,526	42,510	0,000	0,016
4:00	0,000	25,603	24,015	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	49,617	49,595	0,000	0,022
5:00	0,000	29,231	27,478	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	56,709	56,680	0,000	0,029
6:00	0,000	1,562	1,686	0,000	100,000	3,130	7,125	0,000	113,503	113,360	0,000	0,146
7:00	0,000	11,482	10,570	0,000	99,970	20,167	22,382	0,000	164,570	164,372	0,000	0,207
8:00	0,000	66,193	75,310	0,000	0,000	39,613	39,613	0,000	220,731	120,445	100,000	0,289
9:00	0,000	2,858	0,000	0,000	0,000	55,128	55,523	0,000	113,509	113,360	0,000	0,150
10:00	0,000	1,120	20,050	0,000	0,000	67,577	53,072	0,000	141,820	141,700	0,000	0,141
11:00	0,000	2,863	1,439	0,000	0,000	84,618	74,341	0,000	163,261	162,955	0,000	0,307
12:00	0,000	8,222	8,052	0,000	0,000	61,432	78,396	0,000	156,102	155,870	0,000	0,256
13:00	0,000	4,885	25,284	0,000	0,000	39,236	58,231	0,000	127,636	127,530	0,000	0,111
14:00	0,000	7,659	9,767	0,000	99,921	22,425	16,294	0,000	156,066	155,870	0,000	0,205
15:00	0,000	18,044	2,239	0,000	99,991	24,451	25,555	0,000	170,280	170,040	0,000	0,252
16:00	0,000	22,023	55,034	0,000	100,000	10,726	10,726	0,000	198,510	198,380	0,000	0,139
17:00	0,000	2,501	3,835	0,000	99,988	2,810	4,270	71,326	184,731	184,210	0,000	0,532



Lanjutan Tabel L.1.1

Jam	Pembangkitan (kW)									Load (kW)		Losses (kW)
	DG 1	WT 1	WT 2	DG 2	BAT 1	PV 1	PV 2	BAT 2	Total	Load	Charge	
18:00	52,500	0,000	0,000	52,500	0,000	0,000	0,000	65,357	170,357	170,040	0,000	0,317
19:00	52,500	0,000	0,000	52,500	0,000	0,000	0,000	36,905	141,905	141,700	0,000	0,206
20:00	52,500	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	61,108	113,608	113,360	0,000	0,250
21:00	52,500	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	46,871	99,371	99,190	0,000	0,182
22:00	52,500	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	32,650	85,150	85,020	0,000	0,131
23:00	72,547	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	98,668	171,215	70,850	100,000	0,370
0:00	0,000	0,000	0,000	0,000	56,724	0,000	0,000	0,000	56,724	56,680	0,000	0,049
<b>TOTAL</b>	335,047	254,987	313,836	105,000	741,131	431,314	445,529	412,885	3039,729	2835,417	200,000	4,434
<b>MIN</b>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	42,526	42,510	0,000	0,016
<b>MAX</b>	72,547	66,193	75,310	52,500	100,000	84,618	78,396	98,668	220,731	198,380	100,000	0,532
<b>MEAN</b>	13,960	10,624	13,077	4,375	30,880	17,971	18,564	17,204	126,655	118,142	8,333	0,185

Tabel L.1.2 Daya Pembangkitan, Beban, dan Losses selama 24 Jam menggunakan Metode PSO pada Studi Kasus II

Jam	Pembangkitan (kW)									Load (kW)		Losses (kW)
	DG 1	WT 1	WT 2	DG 2	BAT 1	PV 1	PV 2	BAT 2	Total	Load	Charge	
1:00	0,000	1,178	0,293	0,000	83,644	0,000	0,000	0,000	85,115	85,020	0,000	0,096
2:00	0,000	27,009	29,700	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	56,710	56,680	0,000	0,030
3:00	0,000	20,256	22,271	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	42,527	42,510	0,000	0,017
4:00	0,000	26,299	23,319	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	49,617	49,595	0,000	0,022
5:00	0,000	29,599	27,111	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	56,709	56,680	0,000	0,029
6:00	71,656	11,491	22,906	0,000	0,000	5,257	2,214	0,000	113,524	113,360	0,000	0,164
7:00	52,536	33,850	51,473	0,000	0,000	17,486	9,201	0,000	164,546	164,372	0,000	0,175
8:00	0,000	66,560	75,310	0,000	0,000	39,613	39,613	0,000	221,097	120,445	100,000	0,652
9:00	0,000	26,879	66,621	0,000	0,000	60,809	59,250	0,000	213,558	113,360	100,000	0,200
10:00	0,000	22,962	58,433	0,000	0,000	80,460	80,460	0,000	242,316	141,700	100,000	0,616
11:00	0,000	12,178	15,625	0,000	0,000	84,516	50,828	0,000	163,147	162,955	0,000	0,192
12:00	0,000	24,154	50,083	0,000	0,000	90,951	90,951	0,000	256,139	155,870	100,000	0,269
13:00	0,000	39,196	55,034	0,000	0,000	66,941	66,941	0,000	228,112	127,530	100,000	0,582
14:00	0,000	14,083	12,187	0,000	100,000	22,570	7,219	0,000	156,059	155,870	0,000	0,198
15:00	0,000	9,968	12,143	0,000	100,000	22,290	25,845	0,000	170,246	170,040	0,000	0,216
16:00	66,432	1,166	37,822	0,000	0,000	5,948	8,210	79,134	198,713	198,380	0,000	0,334
17:00	52,500	0,000	0,000	75,174	0,000	0,000	0,000	56,861	184,535	184,210	0,000	0,325
18:00	52,500	0,000	0,000	70,187	0,000	0,000	0,000	47,627	170,314	170,040	0,000	0,274
19:00	52,500	0,000	0,000	52,500	0,000	0,000	0,000	36,905	141,905	141,700	0,000	0,206
20:00	113,771	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	113,771	113,360	0,000	0,440

Lanjutan Tabel L.1.2

Jam	Pembangkitan (kW)									Load (kW)		Losses (kW)
	DG 1	WT 1	WT 2	DG 2	BAT 1	PV 1	PV 2	BAT 2	Total	Load	Charge	
21:00	99,504	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	99,504	99,190	0,000	0,330
22:00	85,250	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	85,250	85,020	0,000	0,238
23:00	171,838	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	171,838	70,850	100,000	0,989
0:00	0,000	0,000	0,000	0,000	56,724	0,000	0,000	0,000	56,724	56,680	0,000	0,049
<b>TOTAL</b>	818,487	366,829	560,331	197,861	340,368	496,841	440,731	220,527	3441,976	2835,417	600,000	6,642
<b>MIN</b>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	42,527	42,510	0,000	0,017
<b>MAX</b>	171,838	66,560	75,310	75,174	100,000	90,951	90,951	79,134	256,139	198,380	100,000	0,989
<b>MEAN</b>	34,104	15,285	23,347	8,244	14,182	20,702	18,364	9,189	143,416	118,142	25,000	0,277

## LAMPIRAN 2

### HASIL SIMULASI MENGGUNAKAN METODE FA

Tabel L.2.1 Daya Pembangkitan, Beban, dan Losses selama 24 Jam menggunakan Metode FA pada Studi Kasus I

Jam	Pembangkitan (kW)									Load (kW)		Losses (kW)
	DG 1	WT 1	WT 2	DG 2	BAT 1	PV 1	PV 2	BAT 2	Total	Load	Charge	
1:00	0,000	2,181	2,465	0,000	80,460	0,000	0,000	0,000	85,105	85,020	0,000	0,087
2:00	0,000	29,258	27,451	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	56,709	56,680	0,000	0,029
3:00	0,000	24,593	17,934	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	42,527	42,510	0,000	0,017
4:00	0,000	28,921	20,697	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	49,618	49,595	0,000	0,023
5:00	0,000	30,323	26,386	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	56,709	56,680	0,000	0,030
6:00	0,000	19,522	21,384	0,000	60,321	5,285	6,901	0,000	113,413	113,360	0,000	0,054
7:00	0,000	18,420	12,246	0,000	92,476	18,425	22,980	0,000	164,547	164,372	0,000	0,182
8:00	0,000	75,310	66,190	0,000	0,000	39,613	39,613	0,000	220,727	120,445	0,000	0,285
9:00	0,000	15,556	3,333	0,000	0,000	49,134	45,449	0,000	113,472	113,360	100,000	0,113
10:00	0,000	17,060	20,860	0,000	0,000	71,313	32,553	0,000	141,786	141,700	0,000	0,108
11:00	0,000	8,642	13,354	0,000	0,000	73,866	67,319	0,000	163,181	162,955	0,000	0,226
12:00	0,000	27,667	5,601	0,000	0,000	50,143	72,681	0,000	156,092	155,870	0,000	0,235
13:00	0,000	18,495	0,580	0,000	0,000	65,273	43,312	0,000	127,659	127,530	0,000	0,146
14:00	0,000	12,822	42,258	0,000	63,220	19,318	18,328	0,000	155,945	155,870	0,000	0,077
15:00	0,000	26,937	1,132	0,000	95,463	25,469	21,274	0,000	170,275	170,040	0,000	0,245
16:00	0,000	51,905	35,723	0,000	91,140	10,721	9,051	0,000	198,539	198,380	0,000	0,166
17:00	0,000	11,500	0,911	0,000	73,966	1,343	4,591	92,488	184,798	184,210	0,000	0,597

Lanjutan Tabel L.2.1

Jam	Pembangkitan (kW)									Load (kW)		Losses (kW)
	DG 1	WT 1	WT 2	DG 2	BAT 1	PV 1	PV 2	BAT 2	Total	Load	Charge	
18:00	0,000	8,690	8,690	0,000	95,846	0,000	0,000	57,201	170,426	170,040	0,000	0,393
19:00	53,057	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	89,076	142,133	141,700	0,000	0,439
20:00	53,086	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	60,521	113,607	113,360	0,000	0,249
21:00	61,667	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	37,701	99,368	99,190	0,000	0,180
22:00	58,892	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	26,262	85,155	85,020	0,000	0,135
23:00	76,518	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	94,692	171,210	70,850	0,000	0,365
0:00	0,000	0,000	0,000	0,000	56,724	0,000	0,000	0,000	56,724	56,680	100,000	0,049
<b>TOTAL</b>	303,220	427,801	327,193	0,000	709,616	429,902	384,050	457,942	3039,726	2835,417	200,000	4,428
<b>MIN</b>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	42,527	42,510	0,000	0,017
<b>MAX</b>	76,518	75,310	66,190	0,000	95,846	73,866	72,681	94,692	220,727	198,380	100,000	0,597
<b>MEAN</b>	12,634	17,825	13,633	0,000	29,567	17,913	16,002	19,081	126,655	118,142	8,333	0,184

Tabel L.2.2 Daya Pembangkitan, Beban, dan Losses selama 24 Jam menggunakan Metode FA pada Studi Kasus II

Jam	Pembangkitan (kW)									Load (kW)		Losses (kW)
	DG 1	WT 1	WT 2	DG 2	BAT 1	PV 1	PV 2	BAT 2	Total	Load	Charge	
1:00	0,000	2,773	2,795	0,000	79,535	0,000	0,000	0,000	85,103	85,020	0,000	0,085
2:00	0,000	29,850	26,859	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	56,709	56,680	0,000	0,030
3:00	0,000	23,314	19,213	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	42,526	42,510	0,000	0,016
4:00	0,000	23,330	26,287	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	49,618	49,595	0,000	0,023
5:00	0,000	29,671	27,039	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	56,709	56,680	0,000	0,029
6:00	81,691	12,648	7,995	0,000	0,000	4,600	6,641	0,000	113,574	113,360	0,000	0,215
7:00	66,988	44,919	28,385	0,000	0,000	5,239	19,103	0,000	164,634	164,372	0,000	0,263
8:00	0,000	75,310	66,556	0,000	0,000	39,613	39,613	0,000	221,093	120,445	0,000	0,648
9:00	0,000	39,782	54,465	0,000	0,000	60,809	58,495	0,000	213,551	113,360	100,000	0,192
10:00	0,000	38,034	60,828	0,000	0,000	63,043	80,460	0,000	242,365	141,700	100,000	0,665
11:00	0,000	5,768	8,623	0,000	0,000	82,044	66,771	0,000	163,206	162,955	100,000	0,251
12:00	0,000	22,259	62,276	0,000	0,000	83,092	88,473	0,000	256,100	155,870	0,000	0,270
13:00	0,000	39,196	55,034	0,000	0,000	66,941	66,941	0,000	228,112	127,530	100,000	0,582
14:00	0,000	42,651	10,754	0,000	71,092	22,188	9,332	0,000	156,017	155,870	100,000	0,151
15:00	0,000	35,550	27,290	0,000	59,563	24,999	22,752	0,000	170,154	170,040	0,000	0,117
16:00	0,000	31,707	48,011	0,000	97,346	10,726	10,726	0,000	198,516	198,380	0,000	0,144
17:00	65,040	14,892	1,872	0,000	0,000	4,689	0,039	98,207	184,740	184,210	0,000	0,531
18:00	66,579	6,780	8,614	0,000	0,000	0,000	0,000	88,504	170,477	170,040	0,000	0,437
19:00	142,417	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	142,417	141,700	0,000	0,717
20:00	113,771	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	113,771	113,360	0,000	0,440

Lanjutan Tabel L.2.2

Jam	Pembangkitan (kW)									Load (kW)		Losses (kW)
	DG 1	WT 1	WT 2	DG 2	BAT 1	PV 1	PV 2	BAT 2	Total	Load	Charge	
21:00	99,504	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	99,504	99,190	0,000	0,330
22:00	85,250	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	85,250	85,020	0,000	0,238
23:00	171,838	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	171,838	70,850	0,000	0,989
0:00	0,000	0,000	0,000	0,000	56,724	0,000	0,000	0,000	56,724	56,680	100,000	0,049
<b>TOTAL</b>	893,078	518,436	542,895	0,000	364,260	467,984	469,347	186,711	3442,710	2835,417	600,000	7,412
<b>MIN</b>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	42,526	42,510	0,000	0,016
<b>MAX</b>	171,838	75,310	66,556	0,000	97,346	83,092	88,473	98,207	256,100	198,380	100,000	0,989
<b>MEAN</b>	37,212	21,601	22,621	0,000	15,177	19,499	19,556	7,780	143,446	118,142	25,000	0,309

### LAMPIRAN 3

#### HASIL SIMULASI MENGGUNAKAN METODE SAMFA

Tabel L.3.1 Daya Pembangkitan, Beban, dan Losses selama 24 Jam menggunakan Metode FA pada Studi Kasus I

Jam	Pembangkitan (kW)									Load (kW)		Losses (kW)
	DG 1	WT 1	WT 2	DG 2	BAT 1	PV 1	PV 2	BAT 2	Total	Load	Charge	
1:00	0,000	2,477	2,767	0,000	79,860	0,000	0,000	0,000	85,104	85,020	0,000	0,085
2:00	0,000	29,297	27,413	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	56,709	56,680	0,000	0,029
3:00	0,000	21,987	20,540	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	42,526	42,510	0,000	0,016
4:00	0,000	25,493	24,124	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	49,617	49,595	0,000	0,022
5:00	0,000	29,275	27,434	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	56,709	56,680	0,000	0,029
6:00	0,000	15,959	22,445	0,000	64,914	3,367	6,728	0,000	113,414	113,360	0,000	0,055
7:00	0,000	52,379	51,610	0,000	30,008	16,151	14,307	0,000	164,453	164,372	0,000	0,082
8:00	0,000	21,100	30,140	0,000	0,000	37,446	31,813	0,000	120,499	120,445	0,000	0,054
9:00	0,000	9,953	0,000	0,000	0,000	57,131	46,405	0,000	113,489	113,360	0,000	0,129
10:00	0,000	2,883	2,659	0,000	0,000	76,091	60,281	0,000	141,914	141,700	0,000	0,214
11:00	0,000	14,863	-4,652	0,000	0,000	82,434	70,607	0,000	163,252	162,955	0,000	0,309
12:00	0,000	5,913	7,505	0,000	0,000	75,553	67,128	0,000	156,099	155,870	0,000	0,236
13:00	0,000	3,660	4,373	0,000	0,000	61,818	57,820	0,000	127,671	127,530	0,000	0,167
14:00	0,000	42,057	36,816	0,000	42,989	22,221	11,864	0,000	155,947	155,870	0,000	0,078
15:00	0,000	37,541	25,772	0,000	63,132	24,848	18,867	0,000	170,160	170,040	0,000	0,124
16:00	0,000	53,559	37,743	0,000	93,828	6,965	6,441	0,000	198,537	198,380	0,000	0,164
17:00	0,000	15,413	9,961	0,000	50,608	5,070	1,913	101,804	184,768	184,210	0,000	0,570



Lanjutan Tabel L.3.1

Jam	Pembangkitan (kW)									Load (kW)		Losses (kW)
	DG 1	WT 1	WT 2	DG 2	BAT 1	PV 1	PV 2	BAT 2	Total	Load	Charge	
18:00	0,000	3,202	7,980	0,000	64,916	0,000	0,000	94,489	170,588	170,040	0,000	0,556
19:00	0,000	0,000	0,000	0,000	44,582	0,000	0,000	97,720	142,302	141,700	0,000	0,603
20:00	52,500	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	61,108	113,608	113,360	0,000	0,250
21:00	52,500	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	46,871	99,371	99,190	0,000	0,182
22:00	52,500	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	32,650	85,150	85,020	0,000	0,131
23:00	74,468	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	96,744	171,212	70,850	0,000	0,367
0:00	0,000	0,000	0,000	0,000	56,724	0,000	0,000	0,000	56,724	56,680	100,000	0,049
<b>TOTAL</b>	231,968	387,012	334,627	0,000	591,563	469,094	394,175	531,386	2939,825	2835,417	100,000	4,503
<b>MIN</b>	0,000	0,000	-4,652	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	42,526	42,510	0,000	0,016
<b>MAX</b>	74,468	53,559	51,610	0,000	93,828	82,434	70,607	101,804	198,537	198,380	100,000	0,603
<b>MEAN</b>	9,665	16,126	13,943	0,000	24,648	19,546	16,424	22,141	122,493	118,142	4,167	0,188

Tabel L.3.2 Daya Pembangkitan, Beban, dan Losses selama 24 Jam menggunakan Metode FA pada Studi Kasus II

Jam	Pembangkitan (kW)									Load (kW)		Losses (kW)
	DG 1	WT 1	WT 2	DG 2	BAT 1	PV 1	PV 2	BAT 2	Total	Load	Charge	
1:00	0,000	2,565	2,423	0,000	80,116	0,000	0,000	0,000	85,105	85,020	0,000	0,086
2:00	0,000	29,193	27,517	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	56,709	56,680	0,000	0,029
3:00	0,000	21,890	20,637	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	42,526	42,510	0,000	0,016
4:00	0,000	25,646	23,972	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	49,617	49,595	0,000	0,022
5:00	0,000	27,994	28,716	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	56,709	56,680	0,000	0,030
6:00	60,727	22,687	21,541	0,000	0,000	5,478	3,073	0,000	113,507	113,360	0,000	0,147
7:00	52,500	60,476	15,602	0,000	0,000	18,519	17,528	0,000	164,624	164,372	0,000	0,253
8:00	0,000	66,560	75,310	0,000	0,000	39,614	39,613	0,000	221,097	120,445	0,000	0,652
9:00	0,000	26,209	66,621	0,000	0,000	59,588	61,148	0,000	213,565	113,360	100,000	0,207
10:00	0,000	60,828	20,619	0,000	0,000	80,460	80,460	0,000	242,367	141,700	100,000	0,667
11:00	0,000	17,226	9,506	0,000	0,000	83,393	53,042	0,000	163,167	162,955	100,000	0,212
12:00	0,000	34,946	39,300	0,000	0,000	90,951	90,955	0,000	256,152	155,870	0,000	0,282
13:00	0,000	39,196	55,034	0,000	0,000	66,941	66,941	0,000	228,112	127,530	100,000	0,582
14:00	0,000	38,401	29,800	0,000	50,687	18,795	18,272	0,000	155,954	155,870	100,000	0,086
15:00	0,000	37,149	31,155	0,000	63,692	22,334	15,819	0,000	170,149	170,040	0,000	0,112
16:00	0,000	54,790	54,437	0,000	73,619	5,593	10,061	0,000	198,499	198,380	0,000	0,124
17:00	67,184	12,089	8,165	0,000	0,000	4,149	4,579	88,491	184,656	184,210	0,000	0,450
18:00	61,820	5,160	8,382	0,000	0,000	0,000	0,000	95,142	170,504	170,040	0,000	0,465
19:00	52,500	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	89,636	142,136	141,700	0,000	0,441
20:00	113,771	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	113,771	113,360	0,000	0,440

Lanjutan Tabel L.3.2

Jam	Pembangkitan (kW)									Load (kW)		Losses (kW)
	DG 1	WT 1	WT 2	DG 2	BAT 1	PV 1	PV 2	BAT 2	Total	Load	Charge	
21:00	99,504	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	99,504	99,190	0,000	0,330
22:00	85,250	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	85,250	85,020	0,000	0,238
23:00	171,838	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	171,838	70,850	0,000	0,989
0:00	0,000	0,000	0,000	0,000	56,724	0,000	0,000	0,000	56,724	56,680	100,000	0,049
<b>TOTAL</b>	765,094	583,003	538,735	0,000	324,838	495,814	461,489	273,269	3442,243	2835,417	600,000	6,907
<b>MIN</b>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	42,526	42,510	0,000	0,016
<b>MAX</b>	171,838	66,560	75,310	0,000	80,116	90,951	90,955	95,142	256,152	198,380	100,000	0,989
<b>MEAN</b>	31,879	24,292	22,447	0,000	13,535	20,659	19,229	11,386	143,427	118,142	25,000	0,288

## LAMPIRAN 4

### REKAP DATA STATISTIK

Tabel L.4.1 Data Statistik Hasil Simulasi Metode SAMFA Studi Kasus I

Running ke-	Fitness Value	Rugi Umur Baterai	Biaya Pembangkitan	Rugi Umur Baterai
1	6,43	0,51%	Rp 4.509.617,65	Rp 6.791,03
2	6,4531	0,52%	Rp 4.512.923,79	Rp 6.834,04
3	6,4244	0,51%	Rp 4.515.337,91	Rp 6.771,15
4	6,4222	0,51%	Rp 4.507.647,64	Rp 6.777,65
5	6,4133	0,51%	Rp 4.501.393,66	Rp 6.768,38
6	6,363	0,50%	Rp 4.534.526,94	Rp 6.615,80
7	6,3962	0,51%	Rp 4.491.682,86	Rp 6.746,92
8	6,4209	0,51%	Rp 4.534.665,79	Rp 6.735,67
9	6,4433	0,52%	Rp 4.496.510,14	Rp 6.837,72
10	6,3891	0,51%	Rp 4.513.330,96	Rp 6.700,67
11	6,3943	0,51%	Rp 4.469.123,79	Rp 6.775,71
12	6,4465	0,52%	Rp 4.488.317,00	Rp 6.856,24
13	6,3664	0,50%	Rp 4.536.794,79	Rp 6.619,49
14	6,4294	0,51%	Rp 4.532.589,76	Rp 6.756,31
<b>15</b>	<b>6,2878</b>	<b>0,53%</b>	<b>Rp 4.164.718,53</b>	<b>Rp 6.996,92</b>
16	6,4586	0,51%	Rp 4.543.878,57	Rp 6.800,51
17	6,3778	0,51%	Rp 4.491.626,12	Rp 6.708,80
18	6,2934	0,52%	Rp 4.208.924,65	Rp 6.944,25
19	6,3553	0,50%	Rp 4.539.432,53	Rp 6.592,83
20	6,4852	0,53%	Rp 4.436.154,82	Rp 7.012,32
21	6,3008	0,52%	Rp 4.217.786,91	Rp 6.946,69
22	6,3628	0,51%	Rp 4.484.462,04	Rp 6.688,10
23	6,3735	0,51%	Rp 4.466.227,12	Rp 6.736,89
24	6,5247	0,62%	Rp 3.671.858,21	Rp 8.204,10
25	6,3453	0,50%	Rp 4.543.507,30	Rp 6.565,98
<b>Min</b>	6,2878	0,50%	Rp 3.671.858,21	Rp 6.565,98
<b>Max</b>	6,5247	0,62%	Rp 4.543.878,57	Rp 8.204,10
<b>Mean</b>	6,398292	0,52%	Rp 4.436.521,58	Rp 6.831,37

Tabel L.4.2 Data Statistik Hasil Simulasi Metode SAMFA Studi Kasus II

Running ke-	Fitness Value	Rugi Umur Baterai	Biaya Pembangkitan	Rugi Umur Baterai
1	9,6481	0,58%	Rp 8.533,883,39	Rp 7.623,26
2	9,6707	0,58%	Rp 8.512,887,11	Rp 7.700,60
3	9,6884	0,59%	Rp 8.474,785,83	Rp 7.792,54
4	9,8465	0,56%	Rp 8.956,128,25	Rp 7.421,67
5	9,7537	0,61%	Rp 8.396,374,28	Rp 8.042,03
6	9,727	0,60%	Rp 8.431,657,59	Rp 7.935,29
7	9,7353	0,54%	Rp 9.012,285,54	Rp 7.109,41
8	9,7655	0,54%	Rp 9.026,564,79	Rp 7.151,18
9	9,6628	0,58%	Rp 8.483,822,90	Rp 7.726,48
10	9,6499	0,59%	Rp 8.400,329,20	Rp 7.820,97
11	9,7812	0,55%	Rp 8.955,106,62	Rp 7.287,53
12	9,6894	0,59%	Rp 8.454,910,58	Rp 7.823,61
<b>13</b>	<b>9,6343</b>	<b>0,58%</b>	<b>Rp 8.472,157,31</b>	<b>Rp 7.684,16</b>
14	9,6954	0,59%	Rp 8.502,808,85	Rp 7.766,45
15	9,7668	0,60%	Rp 8.459,352,96	Rp 7.977,70
16	9,7063	0,58%	Rp 8.569,605,64	Rp 7.692,07
17	9,6832	0,58%	Rp 8.519,965,98	Rp 7.716,32
18	9,7148	0,60%	Rp 8.405,586,47	Rp 7.947,90
19	9,7426	0,55%	Rp 8.937,097,89	Rp 7.233,64
20	9,7576	0,60%	Rp 8.496,463,17	Rp 7.904,68
21	9,8095	0,55%	Rp 8.978,157,47	Rp 7.312,89
22	9,69	0,59%	Rp 8.435,811,23	Rp 7.852,65
23	9,6836	0,59%	Rp 8.472,791,11	Rp 7.785,66
24	9,7066	0,59%	Rp 8.479,855,52	Rp 7.822,97
25	9,8424	0,56%	Rp 8.912,700,87	Rp 7.476,18
<b>Min</b>	9,6343	0,54%	Rp 8.396,374,28	Rp 7.109,41
<b>Max</b>	9,8465	0,61%	Rp 9.026,564,79	Rp 8.042,03
<b>Mean</b>	9,722064	0,58%	Rp 8.611,243,62	Rp 7.664,31

## BIOGRAFI PENULIS



Penulis dilahirkan di Malang pada tanggal 22 April 1991 dengan nama Aprilily Ajeng Fitriana. Penulis adalah anak pertama dari 2 bersaudara dari pasangan orang tua Supanggih Agus Prasetyo dan Suluh Fachriz Yuniardini. Penulis memulai jenjang pendidikan dari TK hingga SMA di Malang dari tahun 1995 sampai dengan 2009. Pada tahun 2009, penulis mulai hijrah ke Surabaya untuk melanjutkan studi D4 Teknik Elektro Industri di PENS. Pada tahun 2013 penulis lulus studi D4 dan melanjutkan studi Program Magister Teknik Elektro dengan bidang keahlian Teknik Sistem Tenaga. Penulis berkonsentrasi pada pemanfaatan sumber energi terbarukan pada Tugas Akhir dan Tesis. Penulis dapat dihubungi di alamat email [lellyfitriana@gmail.com](mailto:lellyfitriana@gmail.com).